



INVESTIGACIÓN EN VIVO

Nanoóptica: controlando la luz en la nanoescala

Javier Aizpurua, Rubén Esteban, Pablo Alonso-González y Rainer Hillenbrand.

La localización de la luz en diversas nanoestructuras ha permitido superar los límites de la óptica convencional, posibilitando un control sin precedentes de diversos procesos optoelectrónicos. La comprensión de la interacción entre la luz y la materia en la nanoescala sienta las bases de la generación, control, y manipulación de haces de luz en espacios ínfimos, abriendo un nuevo abanico de posibilidades tecnológicas. Entre otras, la nanoóptica permite obtener imágenes nanoscópicas de nanopartículas y sustancias biológicas, transmitir señal óptica de alta densidad en dispositivos, realizar termoterapia contra células cancerígenas o mejorar las prestaciones de células solares.

La luz ha sido un elemento fundamental en nuestra civilización desde tiempos inmemoriales. Por ello, 2015 ha sido reconocido como “año internacional de la luz” por las Naciones Unidas para poner de relevancia la importancia cultural, social, y tecnológica de la luz en nuestra sociedad actual. Asociada al ámbito de lo místico desde las culturas más antiguas, se la relacionaba con los ciclos de la vida, el bienestar, e incluso con la transcendencia de lo divino. Sin embargo, no es hasta hace unos pocos siglos, que el hombre comienza a comprender la naturaleza de la luz y a utilizarla. La luz tiene multitud de implicaciones en nuestra vida cotidiana, ya que establece una de las pautas más importantes en nuestra

relación con el mundo exterior, por medio de nuestros sensores biológicos en la retina. Sin embargo, más allá de esta necesidad biológica humana para relacionarse, la luz también aporta una dimensión tecnológica fundamental ya que constituye un medio de propagación de información (paquetes de luz) rápido, limpio, y muy manejable, así como una herramienta muy valiosa para sondear las propiedades de la materia. Diferentes grupos de investigación en el País Vasco contribuyen actualmente al esfuerzo de generar, controlar y manipular la luz en dimensiones extremadamente pequeñas, del orden del nanómetro, en lo que se denomina genéricamente nanoóptica. El campo de la nanoóptica o

Javier Aizpurua, es Profesor de Investigación en el Centro de Física de Materiales (CFM), Centro mixto CSIC-UPV/EHU, y asociado al Donostia International Physics Center (DIPC), donde es responsable del grupo de Teoría de Nanofotónica.



Rubén Esteban, es Fellow Gipuzkoa en el Donostia International Physics Center (DIPC).



Pablo Alonso-González, es investigador post-doctoral del grupo de Nanoóptica del CIC nanoGUNE.



Rainer Hillenbrand, es Profesor de Investigación Ikerbasque en nanoGUNE, donde lidera el grupo de Nanoóptica, y Joint Professor en la UPV/EHU.





nanofotónica está experimentando un enorme desarrollo debido a los avances tecnológicos que ofrece en ámbitos tan dispares como la microscopía, la bioquímica, las ciencias de materiales, la medicina, la fotovoltaica, o la ingeniería de telecomunicaciones, entre otros.

Un avance fundamental para entender los secretos de la naturaleza de la luz ocurre en el año 1865, cuando J. Clerk Maxwell postula las ecuaciones de los campos electromagnéticos que llevan su nombre y ponen de manifiesto la naturaleza ondulatoria de la luz. De acuerdo con estas ecuaciones, la luz está constituida por una evolución espacial y temporal de campos eléctricos y magnéticos que se retroalimentan en su propagación. Como toda onda, la luz puede ser caracterizada por una magnitud característica denominada longitud de onda, λ , que da cuenta de la distancia entre dos crestas sucesivas. La longitud de onda de la luz que perciben los sensores en nuestra retina abarca un rango entre los 400 nanómetros y los 750 nanómetros (1 nanómetro=10⁻⁹ metros), y está asociada a los distintos colores que distinguimos: el rojo hacia los 750 nm y el violeta hacia los 400 nm. La luz presenta una longitud de onda mucho más pequeña que otras ondas habituales tales como olas u ondas de presión que dan lugar a los sonidos. Otras ondas electromagnéticas que presentan mayor o menor longitud de onda que la luz visible corresponden a luz infrarroja y ultravioleta respectivamente, y pueden ser detectadas por diversos dispositivos tecnológicos. Otro rasgo notorio de la luz es su velocidad de propagación, que es de unos 300.000 Km/s en el vacío, la velocidad más rápida posible para la transferencia de energía y de información.

“La óptica no ha escapado a las grandes oportunidades que le ha brindado la nanotecnología y se ha beneficiado enormemente de ellas”

La tecnología asociada al control de la luz ha sufrido un desarrollo paralelo al de la comprensión de su naturaleza. La utilización de lentes para aumentar el tamaño de un objeto ha sido desarrollada desde la edad media. Sin embargo, estas lentes sufren importantes limitaciones para manipular y focalizar la luz que las atraviesa debido a una propiedad fundamental: como cualquier otra onda, la luz sufre un fenómeno físico denominado difracción, que hace que ésta se desvíe al chocar contra un objeto, como por ejemplo una esquina, una apertura, o una guía de ondas. El fenómeno de difracción de una onda puede ser visualizado fácilmente en la propagación de una ola al incidir sobre una esquina o contra un objeto, los cuales producen nuevos frentes de olas y desviaciones de la dirección de propagación de la ola original, en forma de nuevas olas que se propagan en múltiples direcciones. De la misma manera, la difracción también impide utilizar lentes para localizar la luz a distancias mucho más pequeñas que la mitad de la separación entre dos crestas de la onda (la mitad de la longitud de onda; $\approx \lambda/2$), imponiendo el denominado límite de difracción, tal y como se aprecia en la Figura 1(a). En otras palabras, la luz no se deja “atrapar” fácilmente, sino que escapa y rebota cuando se la intenta “cazar”. Este comportamiento supone un obstáculo para poder acceder con luz a objetos menores que la longitud de onda utilizada, y por tanto, impone un límite a la resolución óptica. En 1873, Ernst Abbe desarrolló su teoría de los límites de la resolución de los microscopios y estableció que el tamaño que podían resolver los mismos, D , venía dado por la fórmula $D = \lambda / (2n \sin \alpha)$, donde λ es la longitud de onda de la luz, n el índice de refracción del medio, y α es el ángulo de semi-apertura del objetivo del microscopio. En la práctica, el límite de difracción hace que no se puedan diferenciar los detalles de objetos menores que aproximadamente la mitad de la longitud de onda mediante óptica convencional. En el caso de la luz, la resolución se limita, por tanto, a unos pocos cientos de nanómetros, es decir, algo menos de un micrómetro.

Durante más de un siglo, las limitaciones impuestas por la difracción han supuesto una barrera para el desarrollo de diferentes tecnologías ópticas. Por ejemplo, la señal óptica ha sido transportada en guías de fibra de dimensiones de micrómetros, y los microscopios ópticos sólo conseguían acceder a los

componentes micrométricos de células y estructuras materiales. Sin embargo, a finales del siglo XX, y de manera más intensa durante el comienzo del siglo XXI, la nanotecnología ha conseguido desarrollar métodos de fabricación que permiten obtener estructuras de tamaño nanométrico que abren nuevas posibilidades en multitud de campos de interés tecnológico. La óptica no ha escapado a las grandes oportunidades que le ha brindado la nanotecnología y se ha beneficiado enormemente de ellas. La fabricación de estructuras de unos pocos nanómetros permiten localizar la luz por debajo del límite de difracción. Esta localización especial se consigue gracias al papel que juegan los electrones de las nanoestructuras que intercambian energía con la luz incidente. Los metales como el oro o la plata ofrecen una de las posibilidades más interesantes para obtener una localización de luz por debajo de la longitud de onda, gracias al mecanismo de acoplo de luz con los electrones libres de los metales, que tienen la capacidad de oscilar colectivamente cuando son excitados por luz, creando una excitación denominada plasmón de superficie. Durante un tiempo extremadamente breve, de unos pocos femtosegundos (10⁻¹⁵ segundos), la energía de la luz queda atrapada en la nanoescala, como “contenida” en la nanopartícula en forma de pseudo-luz. Pasados unos pocos ciclos ópticos, ésta se convierte en otra forma de energía (calor) o se reemite de nuevo como luz al vacío, de donde venía. De manera más específica, cuando las excitaciones de los electrones se producen en una nanoestructura metálica, las oscilaciones de la densidad de carga se localizan en la interfase de las nanoestructuras, creando plasmones de superficie. Los plasmones de superficie se pueden entender como una oscilación de una “sopa” de electrones sobre el fondo formado por los núcleos de los átomos, a modo de olas en el agua. En superficies metálicas de gran extensión, los plasmones se propagan a lo largo de éstas, de manera similar a como lo hacen las olas sobre el mar, pero en este caso en la nanoescala. También es posible atrapar la oscilación de los electrones (plasmón) en partículas metálicas, que pueden ser mucho más pequeñas que la longitud de onda de la luz que las ha excitado. El proceso de excitación de un plasmón en una nanopartícula y, por

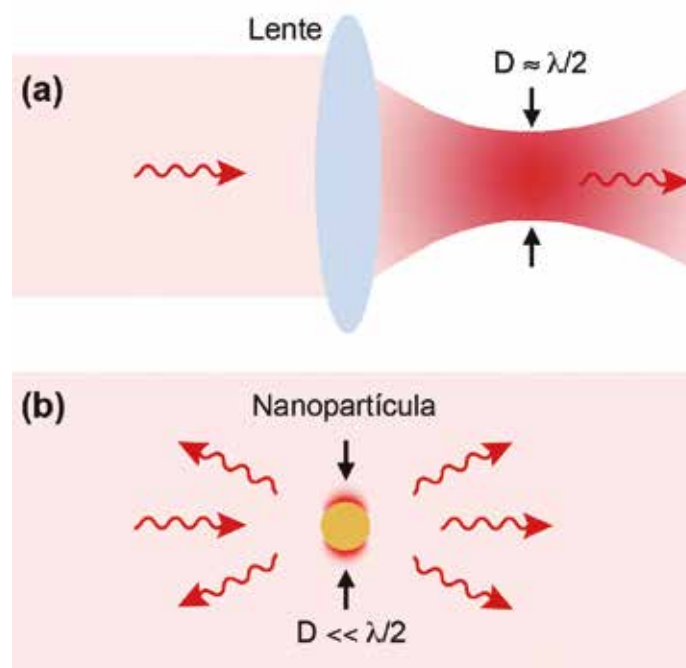


Figura 1. (a) Localización de la luz mediante óptica convencional: una lente focaliza un haz de luz en dimensiones (D) de la mitad de la longitud de onda λ . (b) Localización de la luz por debajo del límite de difracción en nanoóptica gracias a la acción de una nanopartícula metálica de tamaño mucho menor que la longitud de onda ($D \ll \lambda/2$).

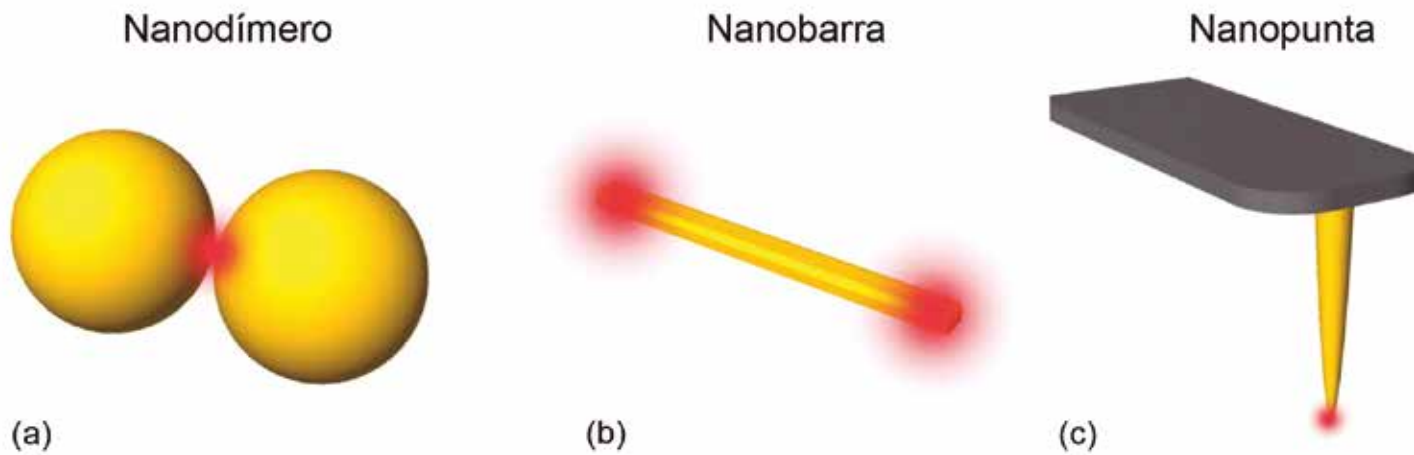


Figura 2. Nanoantenas ópticas comunes utilizadas en nanoóptica, normalmente fabricadas con oro: (a) nanodímero que produce localización y aumento de la señal óptica en el hueco entre las dos partículas, (b) nanobarra que permite una sintonización de la resonancia de antena en función de la longitud de la nanobarra con una dependencia lineal, y (c) nanopunta que localiza la luz en el vértice para su utilización en el barrido nanoscópico.

tanto, el “atrapamiento” de la luz en la misma puede observarse esquemáticamente en la Fig. 1(b).

La localización de la luz por medio de nanoestructuras abre la óptica por primera vez al mundo de la nanoescala. La nanoóptica de plasmones consigue no sólo batir el límite de difracción y localizar la luz en dimensiones minúsculas, que pueden ser incluso del tamaño de unos pocos átomos, sino también aumentar de manera espectacular la intensidad de la misma en los alrededores de la nanopartícula. La localización es un fenómeno resonante, es decir, ocurre únicamente para una determinada longitud de onda que depende de multitud de factores: el material metálico específico, el tamaño, la forma de las nanopartículas, el entorno en que se sitúan, así como la interacción con otras nanopartículas cercanas. Por este motivo, a estas partículas metálicas se les conocen con el nombre de nanoantenas ópticas ya que actúan como dispositivos resonantes muy eficientes para recibir la luz incidente de un color específico, así como también para emitir eficazmente, y en forma de luz, la energía asociada a los plasmones hacia un detector. La comunidad de la nanoóptica junto a la de química sintética y la ingeniería de nanofabricación han diseñado, creado y caracterizado multitud de nanoantenas ópticas entre las que caben destacar las nanobarras, las nanocáscaras, los nanoanillos, las nanoestrellas, los nanodímeros, o las nanopuntas, entre otras. En la Figura 2, se muestran varios ejemplos de nanoantenas típicamente estudiadas y empleadas en nanoóptica. De izquierda a derecha, se muestran (a) un dímero de nanopartículas que localiza el campo entre las dos nanopartículas para producir un aumento de la luz más eficaz, (b) una antena lineal tipo $\lambda/2$ formada por una nanobarra que puede sintonizar la resonancia de la luz desde el visible hasta el infrarrojo, y (c) una estructura de nanopunta que localiza la luz en su vértice y es comúnmente utilizada en microscopías y espectroscopias ópticas a modo de nanolinterna que barre distintas muestras.

“La fusión de modelos clásicos y cuánticos permite estudiar conceptos punteros en nanoóptica en la frontera de la optoelectrónica”

Estas nanoestructuras pueden servir para localizar la luz de un cierto color, en una región específica, o para emitir la energía de manera determinada^[1]. La libertad para “sintonizar” las propiedades ópticas a la carta suponen una de las grandes ventajas de la nanoóptica basada en plasmones, al permitir diseñar las estructuras adecuadas para cada objetivo concreto. De hecho, los plasmones

se han convertido en posibles alternativas para mejorar un amplio abanico de tecnologías. A continuación describimos con cierto detalle algunas de estas posibilidades, haciendo énfasis en la investigación realizada en nuestros grupos en Donostia. Nuestro trabajo combina esfuerzos tanto teóricos como experimentales. El grupo de Teoría de Nanofotónica del Centro de Física de Materiales (CFM) y la fundación Donostia International Physics Center (DIPC), en San Sebastián, ha desarrollado durante los últimos años una línea de investigación sobre teoría y simulación de las propiedades ópticas de nanoantenas similares a las descritas en la Figura 2, así como sobre su aplicación tecnológica. Este

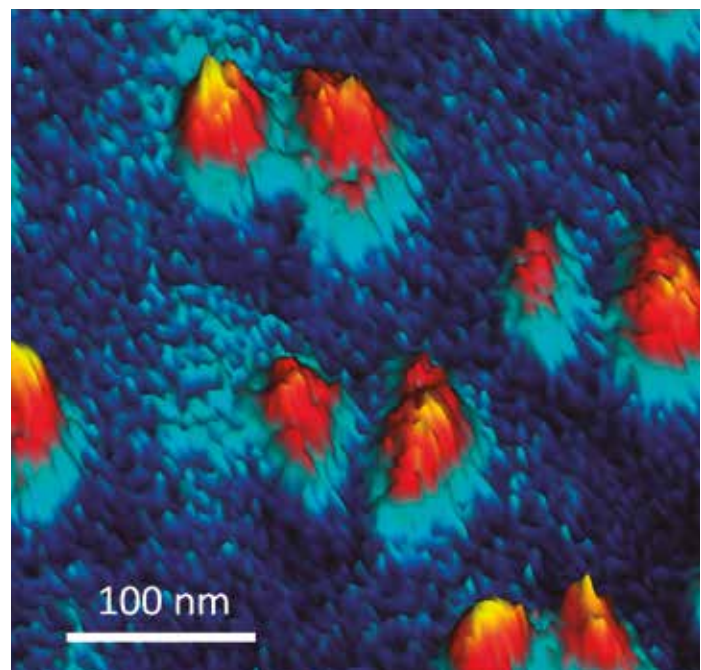


Figura 3. Imágenes ópticas del campo eléctrico local de partículas de Níquel de 90 nm de diámetro, en las que se muestran los dos lóbulos típicos de los dipolos de cada partícula^[9]. Estas imágenes son obtenidas con un microscopio s-SNOM que supera el límite de difracción gracias a la localización de la luz en la punta del microscopio.



desarrollo se ha realizado mediante una descripción clásica de los plasmones a partir de las ecuaciones de Maxwell, a las que se han añadido las complejas interacciones de los electrones debidas a la Mecánica Cuántica, (la teoría física desarrollada a comienzos del siglo XX que describe la dinámica de los objetos microscópicos a través de sus funciones probabilísticas). La fusión de modelos clásicos y cuánticos permite estudiar conceptos punteros en nanoóptica en la frontera de la optoelectrónica. Entre otros, propiedades como el perfil de la densidad electrónica cerca de las superficies de las nanoestructuras, la posibilidad de transferencia de cargas entre partículas separadas por pequeñas distancias (tunelaje cuántico), o la descripción atómica de las estructuras metálicas abren nuevos campos para explorar los límites de la localización de la luz en nanoantenas ópticas [2].

“Gracias a la nanoscopía óptica se obtienen e interpretan imágenes de nanomateriales y nanoestructuras con resolución por debajo de la longitud de onda, nunca logradas anteriormente”

Como primer ejemplo de aplicación de la nanoóptica, destacaremos la utilización de las nanoantenas como sondas para mejorar la resolución en microscopía óptica: tal y como se ha mostrado esquemáticamente en la Figura 2(c), al iluminar una nanoestructura metálica puntiaguda con una determinada longitud de onda, la luz puede quedar “atrapada” en la punta que actúa como una sonda nanoscópica a modo de nanolinterna con capacidad para iluminar un espacio muy reducido. Estas sondas también pueden servir para detectar la luz ya presente en la proximidad de una estructura nanométrica. De esta manera, es posible obtener información óptica local de estructuras de tamaño mucho menor que las obtenidas con métodos de microscopía óptica convencionales. El grupo de Nanoóptica del CIC nanoGUNE de San Sebastián ha desarrollado al límite esta técnica, denominada microscopía óptica de barrido de campo cercano basada en la difusión de la punta (s-SNOM por su acrónimo en inglés). Gracias a la técnica de s-SNOM, el grupo de nanoGUNE ha obtenido e interpretado imágenes de nanomateriales y nanoestructuras con resolución por debajo de la longitud de onda, nunca logradas anteriormente. Como ejemplo, la Figura 3 muestra la imagen de unas partículas de níquel cuya respuesta local (luz del campo cercano) es medida por la punta nanométrica del microscopio s-SNOM. La localización de la luz en zonas de unos pocos nanómetros puede observarse en estas partículas de níquel de 90 nm de diámetro que son iluminadas con luz de 633 nm. Si se utilizara un microscopio óptico convencional, la imagen de cada nanopartícula sería una mancha difusa y homogénea en la que no se distinguiría estructura alguna. Mediante el barrido óptico del microscopio s-SNOM, la estructura de campo local en cada nanopartícula de níquel, compuesta por dos lóbulos en los que se localiza la luz, es claramente discernible, con una resolución que ronda los 20-30 nm, es decir, veinte veces más pequeña que la longitud de onda utilizada para la iluminación. La nanoóptica, por tanto, nos “abre los ojos” al mundo nanométrico, permitiendo acceder a una nueva frontera de la información óptica que estaba vetada anteriormente.

“Gracias al advenimiento de la nanoóptica de plasmones, la señal óptica puede ser “contenida”, manipulada y transportada en soportes materiales de tamaño mínimo.”

Para obtener aún más información de una muestra por medios ópticos, una opción ampliamente utilizada es la espectroscopia. Esta técnica consiste en medir la respuesta óptica de una muestra (por ejemplo una proteína, un virus, la región de un material, etc.) en función de la longitud de onda de un haz de luz incidente, obteniendo de esta manera una “firma” única de los diferentes com-

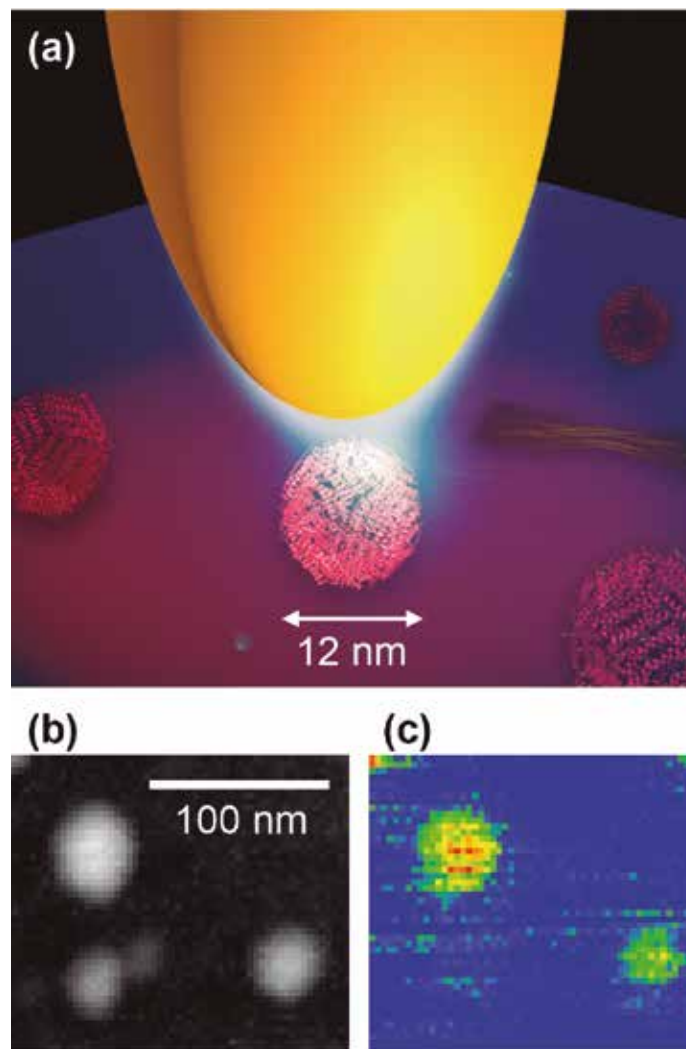


Figura 4. Imagen infrarroja de complejos proteínicos aislados con una resolución mejorada entre 100 y 1000 veces comparada con la microscopía infrarroja convencional [4]. (a) Ilustración de la luz infrarroja iluminando la punta del microscopio de campo cercano sobre el complejo proteínico, que muestra el funcionamiento de la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier en la escala nano (nano-FTIR). Esta técnica permite visualizar e identificar nanomuestras, tales como los complejos proteínicos de la imagen. (b) Imagen de la topografía (mapa de altura) de tres nanopartículas. (c) Imagen de absorción infrarroja de las tres partículas que revela que sólo dos de ellas son complejos proteínicos.

puestos químicos de la muestra, que consiste en una serie de picos de dicha respuesta, y que sirve para identificarla. Pese a sus muchas ventajas, la espectroscopia encuentra a menudo dificultades para detectar cantidades muy pequeñas de un producto o para obtener información individual sobre moléculas separadas por distancias nanométricas. Al localizar y aumentar la luz en la nanoescala, la nanoóptica permite superar los límites convencionales, ofreciendo nuevas posibilidades para diferenciar moléculas muy próximas, así como para aumentar la intensidad de la señal proveniente de la muestra. El grupo de Teoría de Nanofotónica del CFM y DIPIC se ha dedicado desde hace años al estudio y aplicación de técnicas de espectroscopia que utilizan resonancias plasmónicas. Entre estas técnicas podemos destacar la “Espectroscopia Raman Aumentada por Superficie” y la “Espectroscopia de Absorción Infrarroja Aumentada por Superficie” (conocidas por sus acrónimos en inglés como SERS y SEIRA respectivamente). Estas técnicas no sólo son útiles para detectar pequeñas cantidades de moléculas, sino que pueden llegar a servir para estudiar el desarrollo temporal

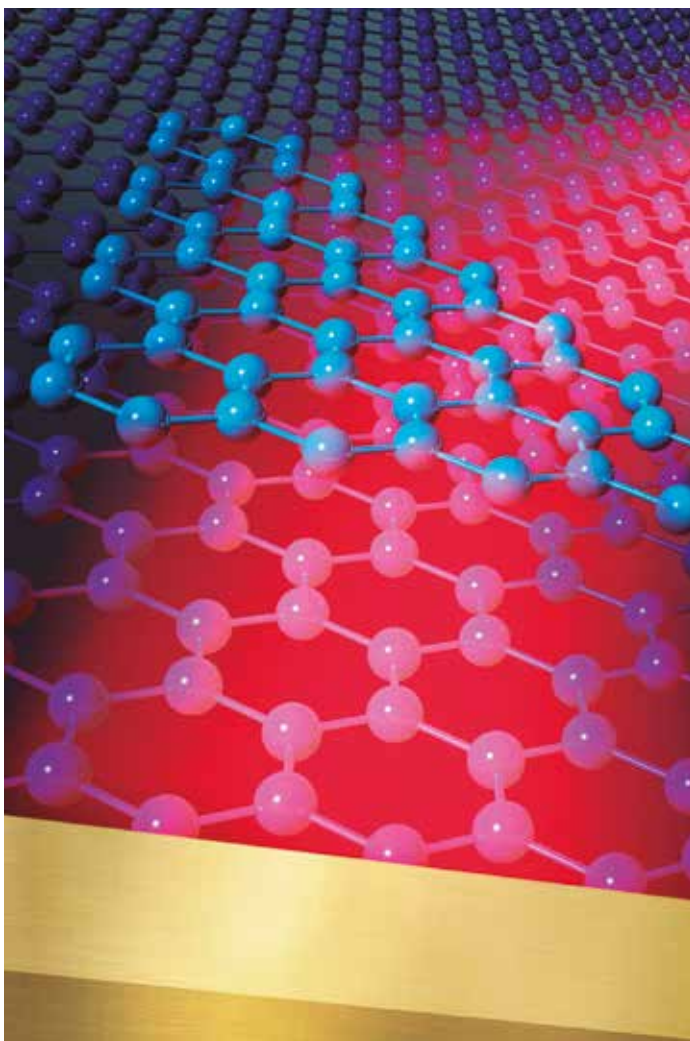


Figura 5. Representación gráfica de la refracción de plasmones en grafeno (en rojo), excitados por una antena de oro diminuta (en amarillo), cuando éstos pasan a través de un prisma de átomos de carbono (en azul claro) de un átomo de grosor. Las medias experimentales de este fenómeno fueron obtenidas en el CIC nanoGUNE ¹⁹.

o espacial de reacciones químicas a partir de la evolución de uno o varios de los productos involucrados. Así mismo, el grupo de Nanoóptica de nanoGUNE ha desarrollado de manera pionera una técnica de imagen basada en nanoespectroscopia infrarroja (nano-FTIR) que permite el estudio de la composición química, estructura y propiedades electrónicas de nanomateriales y nanopartículas. Como ejemplo, en la Figura 4 se muestra la identificación unívoca de complejos proteínicos aislados mediante la obtención de su firma vibracional infrarroja.

Además de su utilización como sonda para obtener imágenes de objetos pequeños, la luz tiene un valor intrínseco por la información que contiene. La energía y la polarización de los campos electromagnéticos, así como la forma espacio-temporal de un pulso de luz contiene información que puede ser transportada, e incluso manipulada, a velocidades mucho más rápidas que las típicamente alcanzables mediante cables de cobre o en el microprocesador de un ordenador, los cuales se basan en el control de los electrones. Como ejemplo de tecnología óptica que ha revolucionado las comunicaciones modernas, las fibras ópticas transportan enormes cantidades de información en forma de luz mediante estructuras dieléctricas cilíndricas de un grosor similar al de la longitud de onda (micrométrico). Gracias al advenimiento de la nanoóptica de plasmones, la señal óptica puede ser “contenida”, manipulada y transportada en soportes mate-

riales de tamaño mínimo, lo cual permite obtener una densidad de dispositivos muy elevada. Sin embargo, los metales típicamente utilizados en plasmónica, tales como oro o plata, presentan pérdidas de energía considerables que conlleven una rápida pérdida de la información sin permitir una propagación de largo alcance de la señal óptica. Por este motivo, existe un gran interés en encontrar nuevos materiales que aúnen las propiedades de nanolocalización y aumento de la densidad de energía provista por los metales, junto a una mayor distancia de propagación. Recientemente, se ha observado que capas de carbono de un átomo de grosor, comúnmente denominadas grafeno, permiten la excitación de electrones libres que generan plasmones de superficie con pocas pérdidas, los cuales ofrecen la posibilidad de atrapar y manipular luz en la nanoescala. Esta capacidad de confinamiento podría ser utilizada en el futuro para el desarrollo de nuevos sensores biológicos ultrasensitivos o dispositivos de tratamiento de la información ópticos. La estructura de este tipo de materiales se representa en la Figura 5, donde se muestra una representación gráfica de una lámina de grafeno sobre la que se propaga un haz de plasmones (en rojo) que ha sido estimulado por una antena de oro (en amarillo) dispuesta sobre el grafeno. Al pasar por una doble lámina de grafeno que forma un prisma de escala atómica (átomos coloreados en azul claro), el haz de plasmones es refractado de la misma manera que lo hace la luz convencional cuando ésta pasa a través de un prisma. Este esquema da una idea de lo robusta que resulta la plataforma material de grafeno para la manipulación de señal óptica en la nanoescala.

“La capacidad de los plasmones de grafeno para confinar la luz podría ser utilizada en el futuro para el desarrollo de nuevos sensores biológicos ultrasensitivos o dispositivos de tratamiento de la información ópticos”

Otros materiales de capas monoatómicas y con estructura química similar, tales como el nitruro de boro, también presentan este tipo de propiedades, y por tanto, abren nuevas opciones en el menú de materiales disponibles para la nanoóptica. Las resonancias plasmónicas en este tipo de materiales suelen darse en longitudes de onda del infrarrojo lejano o incluso en frecuencias de terahercios, es decir, en longitudes de onda mayores que la de la luz visible. Sin embargo, se atisba una convergencia hacia la obtención de resonancias en longitudes de onda ópticas gracias a una optimización de los materiales y de las estructuras geométricas de los mismos.

Los plasmones pueden resultar también de utilidad en muchos otros campos. En medicina, por ejemplo, se pueden diseñar partículas metálicas funcionalizadas con un fármaco determinado que es inyectado en el paciente hasta llegar a una zona de interés (zona tumoral, por ejemplo). Al ser iluminadas con la luz inocua de un láser, las nanopartículas entran en excitación resonante, liberando el fármaco, y aumentando así su efectividad, al tiempo que disminuyen los efectos secundarios del tratamiento. Otra posibilidad consiste en aprovechar el aumento de temperatura asociado a la excitación de plasmones para acabar con las células tumorales presentes en la proximidad de las nanopartículas por calentamiento, en lo que se denomina termoterapia asistida por plasmones.

“La nanoóptica abre un nuevo abanico de posibilidades tecnológicas sin precedentes”

La nanofotónica también ofrece aplicaciones novedosas e innovadoras en el campo de las energías renovables basadas en células solares. La capacidad de las nanopartículas plasmónicas para absorber la luz de manera más eficiente permite utilizarlas junto a materiales que presentan actividad fotovoltaica, de manera que éstos recojan la luz y la transformen en energía eléctrica de manera más eficiente. Otras aplicaciones en esta línea persiguen la conversión de la luz



Figura 6. Áreas de aplicación de la nanoóptica.

del sol en otras formas de energía, diferentes a la energía eléctrica. Por ejemplo, de manera similar a la fotosíntesis en las plantas, el sol puede proporcionar la energía necesaria para inducir una reacción química que produzca algún tipo de combustible, como por ejemplo hidrógeno y oxígeno a partir del agua. El potencial de los plasmones para optimizar estas reacciones, y los procesos físicos asociados a las mismas son objeto de intensa investigación en todo el mundo.

La nanoóptica también muestra un gran potencial en el campo de la información cuántica. Este campo supone un nuevo paradigma en la generación, transmisión, y manipulación de la información. Al contrario que la información clásica basada en bits, es decir, en códigos binarios en los que tenemos dos estados bien definidos (0 o 1), la información cuántica tiene como unidad de información el qubit, es decir, un estado cuántico que presenta una probabilidad de estar entre los estados 0 y 1, y que abre nuevas posibilidades para desarrollar computación más rápida, y más segura, en las que la manipulación de información consiste en el entrelazado de varios de estos qubits. Los plasmones pueden actuar como intermediario de estos estados cuánticos en la nanoescala, y actualmente se está estudiando intensamente si esta intermediación permite el transporte de la información sin deterioro de las propiedades de la misma. La nanoóptica, por tanto, podría servir como catalizador de nuevas posibilidades en información cuántica.

Todas las aplicaciones reseñadas aquí requieren un trabajo profundo de diseño y comprensión de los procesos físicos involucrados, así como su explotación y desarrollo en aplicaciones prácticas que mejoren la competitividad mediante la generación de un conocimiento de vanguardia. El control de la luz en la nanoes-

cala, sin precedentes hasta hace unos pocos años, permite augurar un futuro muy prometedor para la nanoóptica, y en esa tarea trabajan sin descanso el grupo de Nanoóptica de nanoGUNE y el grupo de Teoría de Nanofotónica del CFM-DIPC.

Referencias

- [1] "Metal-nanoparticle plasmonics", M. Pelton, J. Aizpurua and G. W. Bryant. *Laser Photon. Rev.* 2, 136-159 (2008).
- [2] "Revealing the quantum regime in tunnelling plasmonics", Kevin J. Savage, Matthew M. Hawkeye, Ruben Esteban, Andrei G. Borisov,, Javier Aizpurua, and Jeremy J. Baumberg. *Nature* 491, 574 (2012).
- [3] "Plasmonic nickel nanoantennas", J. Chen, P. Albella, Z. Pirzadeh, P. Alonso-Gonzalez, F. Huth, S. Bonetti, V. Bonanni, J. Akerman, J. Nogues, P. Vavassori, A. Dmitriev, J. Aizpurua, and R. Hillenbrand. *Small* 7, 2341-2347 (2011).
- [4] "Structural analysis and mapping of individual protein complexes by infrared nanospectroscopy", I. Amenabar, S. Poly, W. Nuansing, E. H. Hubrich, A. A. Goyadinov, F. Huth, R. Krutokhovostov, L. Zhang, M. Knez, J. Heberle, A. M. Bittner and R. Hillenbrand. *Nature Commun.* 4, 2890 (2013).
- [5] "Controlling graphene plasmons with resonant metal antennas and spatial conductivity patterns", P. Alonso-González, A. Y. Nikitin, F. Golmar, A. Centeno, A. Pesquera, S. Vélez, J. Chen, G. Navickaite, F. Koppens, A. Zurutuza, F. Casanova, L. E. Hueso, and R. Hillenbrand. *Science* 344, 1369-1373 (2014).