

# Plasmones superficiales

*Debido a su carácter bidimensional y capacidad de almacenar luz en espacios reducidos, los plasmones superficiales son firmes candidatos a desempeñar una función clave en futuros dispositivos ópticos*

Francisco J. García Vidal y Luis Martín Moreno

**E**s evidente que la luz desempeña una función muy importante en nuestras vidas. Por ello ha sido estudiada durante siglos. Merced a ese esfuerzo se ha acumulado un importante bagaje de conocimientos y dispositivos ópticos, muchos de ellos útiles en nuestro desenvolvimiento diario. Sin embargo, no han dejado de aparecer fenómenos relacionados con la luz que dan lugar a nuevos campos de investigación. Este artículo está dedicado a una nueva rama de la óptica, la plasmónica, que estudia las propiedades ópticas de metales nanoestructurados. Aquí expondremos algunas de las propiedades que se están descubriendo. Atraen la atención de físicos, químicos, biólogos y médicos, bien porque quieren entender sus fundamentos, bien para aplicarlas en dispositivos prácticos.

Los metales, además de reflejar la luz, tienen una propiedad óptica menos conocida: bajo ciertas condiciones la luz puede viajar por las superficies metálicas sin alejarse de ellas. Esta es una propiedad muy peculiar, ya que en condiciones normales la luz viaja por las tres dimensiones del espacio y no se la confina con facilidad. En realidad, esta "luz superficial" es una onda más complicada que la luz normal, ya que no consiste sólo en un campo electromagnético, sino que involucra también los electrones libres presentes en los metales. Rufus Ritchie descubrió estas ondas, o "plasmones superficiales" (PS), en los años cincuenta del pasado siglo.

Sin embargo, como los electrones al moverse disipan energía en forma de calor, a los PS se les había tenido siempre por un sumidero de energía y, por lo tanto, como un inconveniente para la utilización de metales en dispositivos ópticos que envíen energía (información) de un lugar a otro. En efecto, tras haber recorrido

un PS sólo una décima de milímetro, más de la mitad de la intensidad de luz que lleva se ha disipado ya en forma de calor.

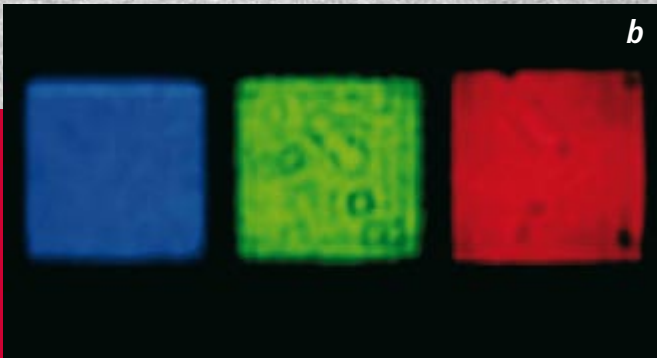
Por tanto, los PS no son muy adecuados si pretendemos valernos de ellos para transportar energía a distancias mayores que las décimas de milímetro. Pero en ciertas aplicaciones ese margen ya no es tan pequeño. La continua miniaturización de los componentes electrónicos ha creado la necesidad de transportar información a escalas de unas pocas micras (una micra o micrometro,  $\mu\text{m}$ , es una milésima de milímetro, mientras que un nanómetro es una milésima de micra). Al mismo tiempo, la técnica que ha dado lugar a esa miniaturización nos permite crear estructuras (hendiduras, protuberancias, agujeros, etcétera) en las superficies metálicas en escalas micrométricas o nanométricas con una precisión y control antes inaccesibles, abriéndose la posibilidad de controlar a voluntad las propiedades de los plasmones superficiales.

Las investigaciones de numerosos grupos repartidos por todo el mundo persiguen generar eficientemente estos PS, moverlos por la superficie a nuestra voluntad (creando para ellos los equivalentes a lentes, divisores de haz, guías de onda, transistores y circuitos), y extraer la energía que llevan, probablemente en forma de luz o de señal eléctrica, para poder transportarla a mayores distancias. En un campo emergente tan activo como la plasmónica, es difícil saber dónde aparecerán las aplicaciones más interesantes. Aquí nos vamos a centrar en las tres áreas de la óptica de metales que hoy en día parecen más prometedoras: la transmisión de luz a través de agujeros pequeños, los sensores moleculares basados en plasmones superficiales y los circuitos plasmónicos.

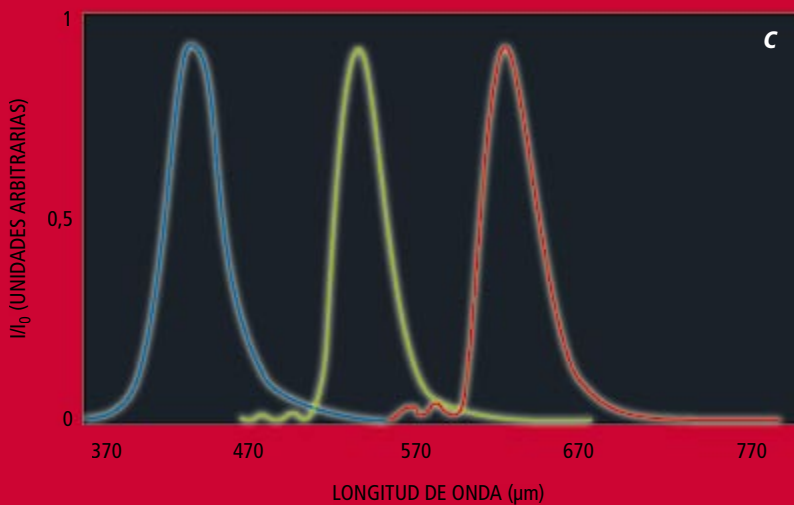
## CONCEPTOS BASICOS

- La luz puede quedar atrapada en la superficie de un metal. Esa "luz superficial" involucra también a los electrones libres de la superficie metálica. Este tipo más complejo de onda recibe el nombre de "plasmón superficial".
- Si en una lámina metálica se perfora un conjunto ordenado de agujeros, el metal que queda entre ellos se vuelve transparente a la luz de determinadas longitudes de onda. En esta "transmisión extraordinaria de luz" es crucial el papel de los plasmones superficiales.
- Los plasmones tendrían en los circuitos ópticos su aplicación más esperanzadora. Pero, por ahora, la principal son los sensores moleculares basados en la resonancia de plasmones superficiales.

a



b



c

1. LA TRANSMISION EXTRAORDINARIA DE LUZ consiste en que un metal perforado con agujeros se vuelve transparente a la luz de ciertas longitudes de onda. En el panel (a) se muestra una imagen, obtenida con un microscopio electrónico, de una lámina de plata de 320 nanómetros (nm) de espesor perforada por un conjunto periódico de agujeros dispuestos en una red cuadrada ( $17 \times 17$ ). El diámetro de los agujeros es de 280 nm y el periodo de la red, de 750 nm. Los paneles (b) y (c) muestran una imagen y un espectro de transmisión, respectivamente, asociados a tres redes de diferentes periodos (azul: 300 nm; verde: 450 nm; rojo: 550 nm). Los espectros de transmisión de las tres redes periódicas (panel c) poseen picos resonantes para estos valores de la longitud de onda: azul en 436 nm, verde en 538 nm y rojo en 627 nm.

## Transmisión extraordinaria de luz

Un agujero en una pantalla opaca es uno de los elementos ópticos más simples que quepa imaginar. El proceso del paso de la luz a través de un agujero pequeño ha sido objeto de curiosidad y utilizado tecnológicamente desde la Antigüedad. En la cámara oscura, el elemento fundamental era un agujero minúsculo que proyectaba la imagen (invertida) en una superficie. El primer estudio científico de la transmisión de luz a través de una apertura circular fue llevado a cabo por Francesco Maria Grimaldi en el siglo XVII. Fue uno de los primeros análisis dentro de la nueva disciplina de la óptica clásica.

En realidad, todos tenemos experiencia de cómo se comporta la luz al pasar por agujeros. Por lo común, se trata de perforaciones mucho mayores que la longitud de onda de la luz. Pero cuando las dimensiones de los agujeros son menores que la longitud de onda de la luz, nuestra intuición falla y aparecen fenómenos de otra naturaleza. Por una parte, como encontró teóricamente Hans Bethe durante los años cuarenta, el porcentaje de luz de longitud de onda  $\lambda$  que atraviesa un agujero circular de diámetro  $d$  en una lámina metálica es proporcional a  $(d/\lambda)^4$ . Es decir, si el diámetro del agujero es mucho menor que la longitud de onda, la eficiencia en el proceso de transmisión resultará pequeñísima.

La luz tampoco emerge del agujero como esperaría la intuición. Mientras que en agujeros grandes sale en la misma dirección por la que incidió (como en las rendijas de una persiana), en el caso de agujeros con tamaños menores que la longitud de onda la escasa luz que se transmite se reparte por igual en todas las direcciones.

Ambas propiedades —baja transmisión y distribución isotropa de la radiación transmitida— constituyen un freno para muchas aplicaciones, que requieren la iluminación intensa de áreas muy pequeñas.

Un gran avance en la superación de la baja transmisión a través de agujeros pequeños se produjo en 1998. El grupo experimental dirigido por Thomas Ebbesen, entonces en los laboratorios del grupo de empresas NEC en Princeton, descubrió que una colección ordenada de agujeros pequeños, perforados en una lámina metálica (véase la figura 1), dejaba pasar no sólo toda la luz que incidía sobre ellos, sino más de la que correspondería por su área. Es decir, los agujeros recogían también gran parte de la luz que incidía sobre la lámina metálica, que prácticamente se volvía transparente. Este resultado sorprendente, de *transmisión extraordinaria de luz*, ocurría para ciertos valores de  $\lambda$  (es decir, para ciertos colores) relacionados

directamente con el período del conjunto de agujeros. De esta relación se dedujo que el fenómeno de transmisión extraordinaria se hallaba ligado a la presencia de plasmones superficiales, lo que explicaba por qué el fenómeno sólo aparecía en sistemas metálicos.

Nuestro grupo acometió en el año 2001 un estudio teórico que descubrió el mecanismo físico por el cual el metal se volvía transparente. Mostramos que la luz, tras entrar en el agujero, va y vuelve repetidamente antes de salir del todo por la otra cara de la lámina. En cada paso sólo se transmite una pequeña fracción de la luz, pero la suma de muchas pequeñas fracciones puede generar una transmisión muy alta. Como la luz es una onda, esa suma es de cantidades unas veces positivas y otras negativas. Sin embargo, para ciertas relaciones entre las dimensiones de la lámina, los agujeros y la longitud de onda, cada fracción de luz transmitida tiene el mismo signo, en cuyo caso decimos que hay ‘interferencia constructiva’ entre todos los pasos de ese proceso complejo.

El papel de los plasmones es crucial. Recogen parte de la luz que se perdería y, como corren por la superficie, la llevan a iluminar otros agujeros y a que vuelva a formar parte del proceso de transmisión. Es importante que esta luz, transportada por los PS y reiluminadora de otros agujeros, interfiera de forma constructiva con la luz incidente. Como las propiedades de interferencia dependen del camino recorrido, la longitud de onda a la que se produce la transparencia guarda una relación directa con el período de la red de agujeros.

## Conductor perfecto

Asociada al fenómeno resonante de la transmisión extraordinaria, se produce una intensa amplificación del campo electromagnético en la superficie metálica (véase el recuadro “El campo eléctrico en la transmisión extraordinaria”). Ese hecho posibilita la aparición de efectos no lineales en la transmisión de luz, incluso a intensidades de la luz incidente no muy altas. En condiciones normales, la transmisión es lineal con la intensidad incidente; es decir, a doble intensidad incidente tenemos doble intensidad en la luz transmitida.

Pero hay materiales que modifican la propagación de la luz de una forma que depende de cuánta luz les llega. En el caso que nos ocupa, si se cubre la superficie metálica con un material dieléctrico no lineal, podemos conseguir que la lámina metálica perforada con agujeros actúe como un interruptor o limitador para el paso de la luz.

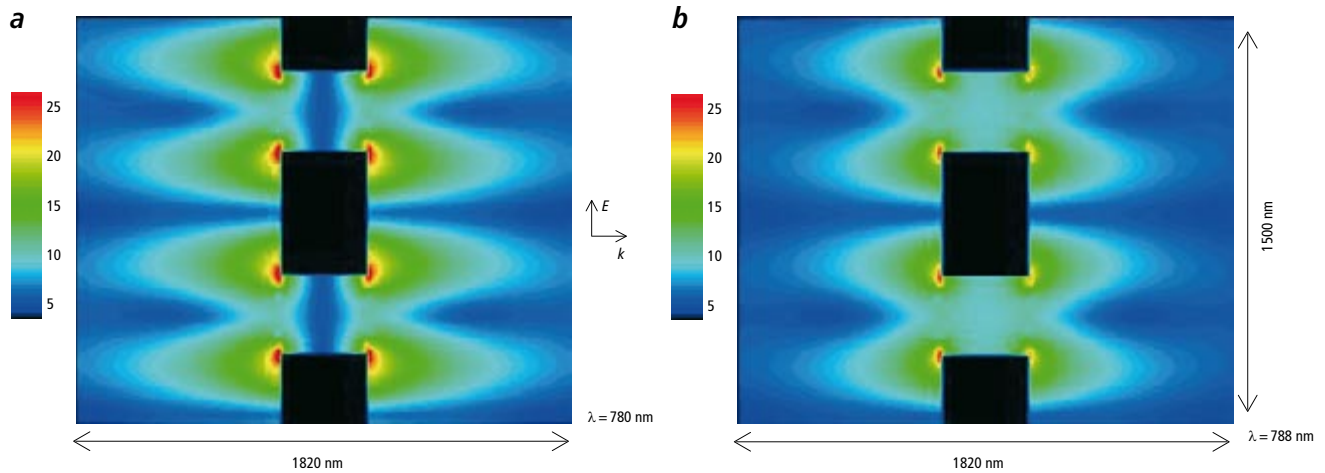
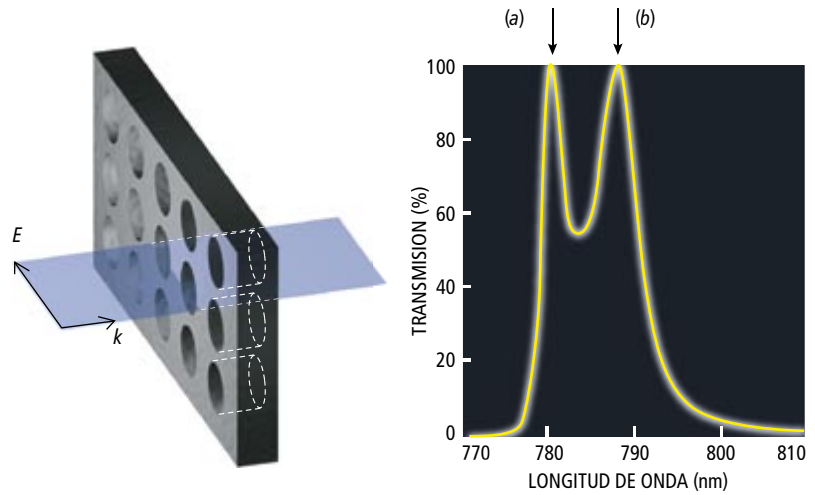
Imaginemos que se trabaja a una longitud de onda resonante en la que, con una baja

## Los autores

**Francisco J. García Vidal** es catedrático del departamento de física teórica de la materia condensada de la Universidad Autónoma de Madrid. **Luis Martín Moreno** es profesor de investigación del Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón y pertenece al departamento de física de la materia condensada de la Universidad de Zaragoza.

# EL CAMPO ELECTRICO EN LA TRANSMISION EXTRAORDINARIA

Los picos de la transmisión de la luz (*gráfica de la derecha*) en una estructura como la descrita en la figura 1 llevan asociada una intensificación del campo eléctrico  $E$  que se propaga en la dirección  $k$ . En los paneles *a* y *b* se muestra la amplitud del campo eléctrico en un plano que corta a la lámina metálica de la forma expuesta en el dibujo. Como se observa en ambos paneles, el campo eléctrico es máximo en las superficies y pequeño dentro de los agujeros, lo que demuestra el papel fundamental que desempeñan los plasmones superficiales en el proceso de transmisión extraordinaria de luz. La amplitud del campo eléctrico está referida al valor correspondiente a la luz incidente. Así, en su máximo en la superficie, la intensidad multiplica por 625 ( $25 \times 25$ ) la intensidad de la luz incidente.



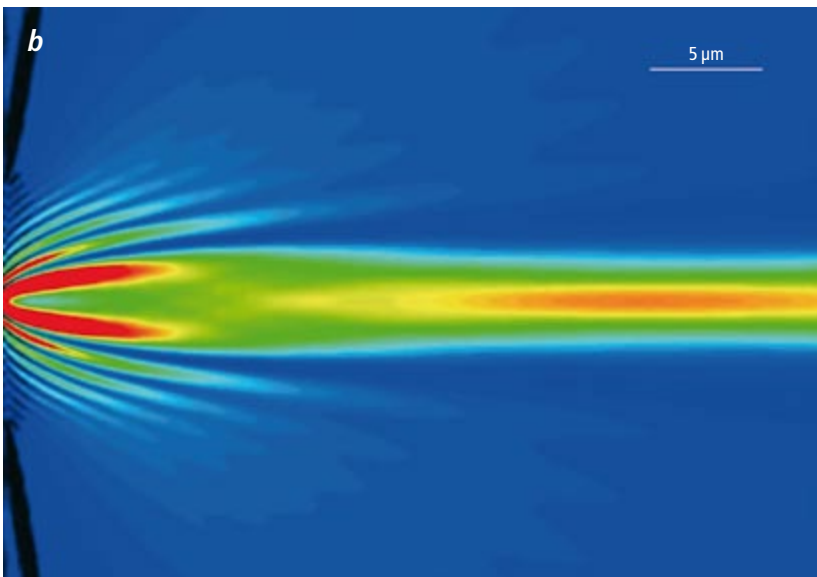
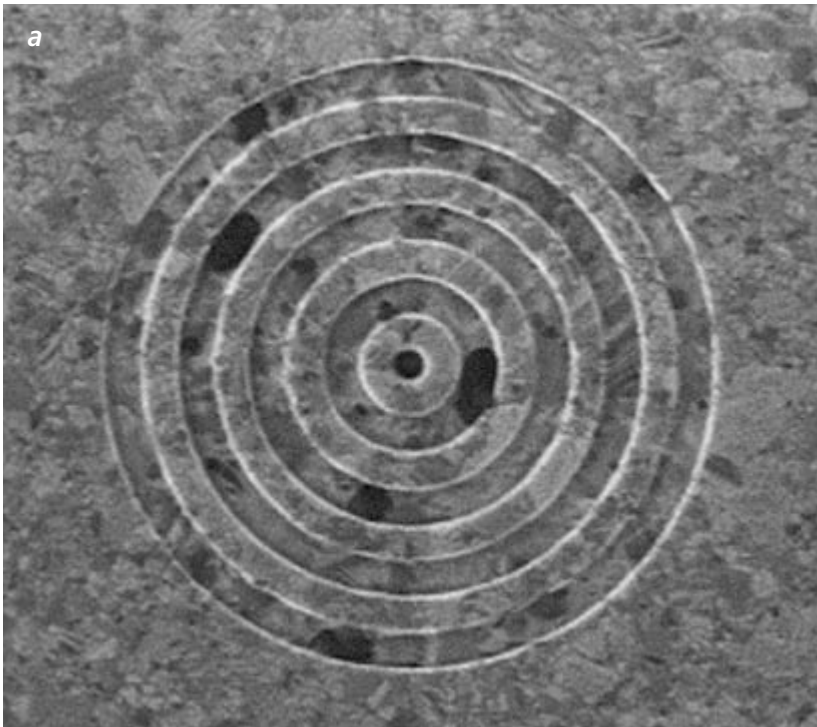
intensidad de luz incidente, se pueden crear PS y, por tanto, obtener alta transmisión. Si aumentamos la intensidad de la luz habrá un momento en que el material no lineal cambie sus propiedades, alterando a su vez la longitud de onda a la que aparecen los PS. Si mantenemos fija la longitud de onda de la luz incidente, dejarán de crearse los PS asociados a esa misma longitud de onda: habrá una drástica disminución de la intensidad de la luz transmitida. Este dispositivo actuaría como una especie de fusible para el paso de la luz.

El experimento original de transmisión extraordinaria se realizó en el rango visible del espectro electromagnético, que comprende longitudes de onda entre 0,3 micrometros (azul) y 0,7 micrometros (rojo). Fuera de ese rango de longitudes de onda existen ondas electromagnéticas (ondas de radio, microondas, ondas de terahertz, luz infrarroja, rayos X, etcétera), aunque nuestros ojos no las pueden percibir. En nuestros cálculos del año 2001 encontramos que el fenómeno de transmisión

extraordinaria aparecía también en el caso hipotético de que el metal perforado tuviera una conductividad eléctrica infinita; es decir, fuera un “conductor perfecto”.

No hay tal en la naturaleza. Sólo existe como idealización teórica, aunque los metales reales iluminados con radiación electromagnética de longitud de onda mayor que 5 micrometros se comportan casi como conductores perfectos. A diferencia de un metal en el rango óptico, en cuyo interior la luz puede penetrar (alrededor de unos 20 nm), un conductor perfecto es impenetrable. Esto tiene unas consecuencias drásticas para la existencia de plasmones superficiales, que requiere la presencia de campos electromagnéticos a ambos lados de la superficie. Por tanto, no hay plasmones superficiales en la superficie de un conductor perfecto.

¿Cuál es, pues, el origen del fenómeno de la transmisión extraordinaria en un conductor perfecto, que no presenta plasmones superficiales? En colaboración con Sir John Pendry, del Colegio Imperial de Londres, descubrimos



## 2. COLIMACION DE LUZ MEDIANTE PLASMONES.

En el panel de arriba se muestra una imagen, tomada por un microscopio electrónico, de una estructura de “ojo de buey”. Un agujero central (en este caso de 250 nm de diámetro) está rodeado por un conjunto de trincheras concéntricas de 250 nm de anchura y 60 nm de profundidad. La separación entre trincheras es de 500 nm. El espesor de la lámina de plata mide 300 nm. Cuando la luz emerge de esta estructura, lo hace, para un valor determinado de la longitud de onda, en forma de haz colimado, como se muestra en el panel de abajo. En esta imagen se representa la amplitud del campo eléctrico obtenida en una simulación numérica del proceso de colimación.

Se permite así una especie de “alquimia” superficial. Antes, sólo podíamos contar con PS en superficies de metales con poca resistencia (y, por tanto, baja absorción de luz), como la plata o el oro. Ahora podemos ir más allá y diseñar metales con propiedades superficiales a la carta, desconocidas en la naturaleza. Por añadidura, nuestro hallazgo teórico extendió la posibilidad de que aparezca la transmisión extraordinaria a metales perforados con agujeros, en el régimen de microondas (donde la distancia entre agujeros es del orden de decenas de milímetros) o en el de terahertz (con una distancia entre agujeros del orden de decenas o centenas de micras).

### Colimación asistida por plasmones superficiales

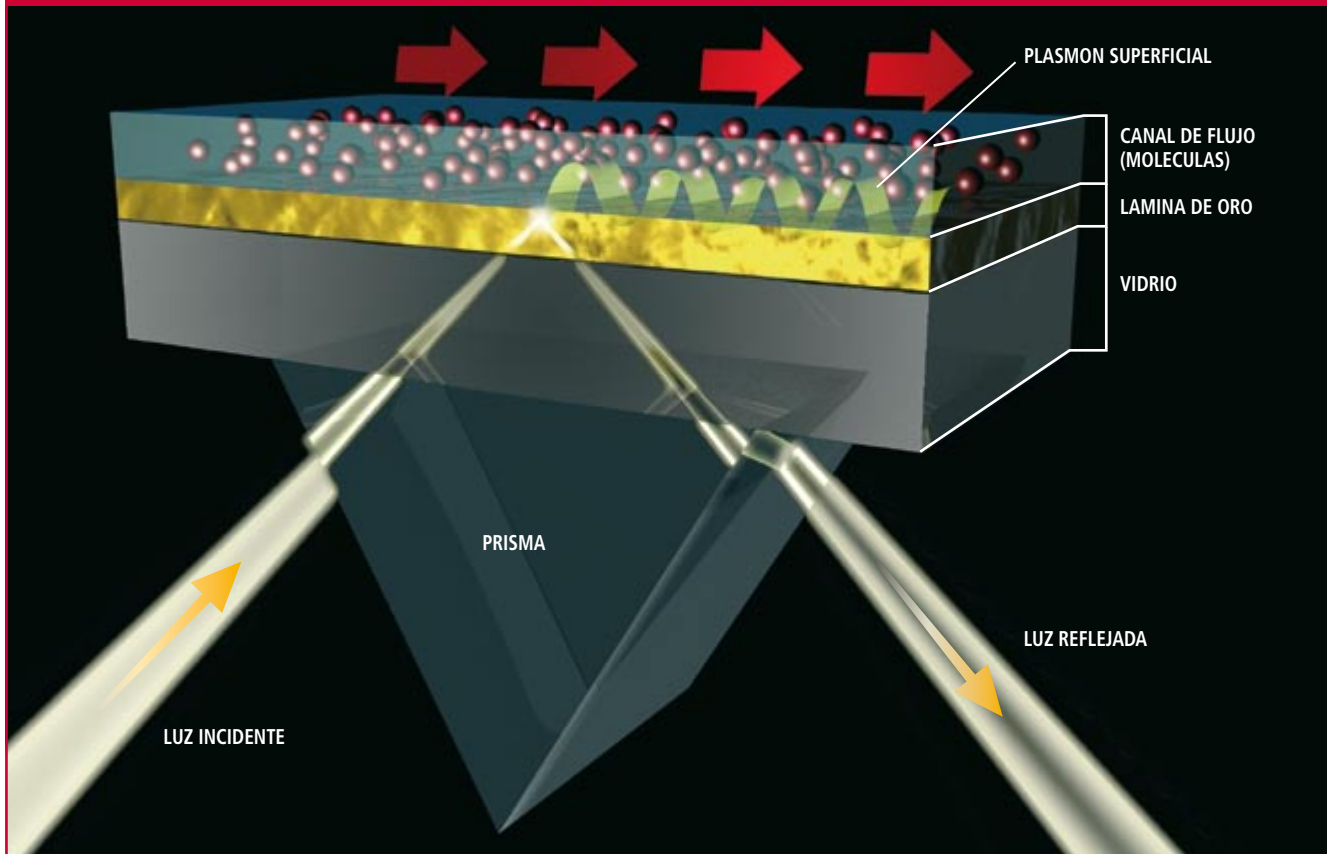
En el experimento original se había conseguido que, sorprendentemente, pasara mucha más luz de la esperada. Pero pasaba a la vez por todos los agujeros. Para iluminar áreas muy pequeñas había que conseguir que la luz atravesase un único agujero. El origen del fenómeno estaba en la interferencia constructiva, apoyada por ondas superficiales. Por lo tanto, si se rodeaba un agujero con una estructura periódica, ésta podría ser reiluminada por los plasmones superficiales y, a su vez, reiluminaría el agujero central, con lo que se aumentaría así la transmisión a través de éste. Esta hipótesis se confirmó experimentalmente en 2002, de nuevo por el grupo dirigido por Thomas Ebbesen, entonces en la Universidad Louis Pasteur en Estrasburgo. Para ello utilizaron las estructuras metálicas denominadas “ojo de buey”, donde un agujero central está rodeado por trincheras concéntricas que no atraviesan el metal (véase la figura 2a).

Más sorprendente resultó el descubrimiento siguiente: creando una estructura “ojo de buey” en la superficie de salida de la lámi-

en 2004 que, si bien la superficie plana de un conductor perfecto no admite la excitación de plasmones, cuando se le inscribe un patrón periódico (por ejemplo, perforándola con un conjunto periódico de agujeros), podrán propagarse por ella ondas superficiales con propiedades muy parecidas a las de los plasmones superficiales que aparecen en un metal en el régimen óptico.

Estas ondas superficiales son las responsables de la transmisión extraordinaria en un conductor perfecto perforado con agujeros. Tienen una virtud fundamental: sus propiedades pueden controlarse a voluntad mediante la geometría de la organización periódica de la superficie.

## RESONANCIA DE PLASMONES SUPERFICIALES



Este es el esquema simplificado del funcionamiento de un dispositivo de resonancia de plasmones superficiales (un detector de moléculas). Se hace que una lámina metálica de oro (con un espesor de unas decenas de nanómetros) crezca sobre un sustrato de vidrio. Por la superficie del metal expuesta al aire se hace circular un fluido compuesto por moléculas, en principio desconocidas. Se manda luz, que pasa por un prisma e incide sobre la superficie del metal, que se halla en contacto con el

vidrio. Este haz de luz genera un plasmón superficial, que corre por la superficie de arriba (dentro de ciertas condiciones de ángulo y longitud de onda). Las propiedades de este plasmón superficial vienen determinadas por el tipo de moléculas adsorbidas por el metal en la superficie. Analizando la razón de dependencia de la intensidad de la luz reflejada respecto del ángulo de incidencia y de la longitud de onda utilizada, podemos determinar qué tipo de moléculas fluye por el canal.

na metálica, se puede conseguir que la luz transmitida salga formando un finísimo haz (con una divergencia angular de unos 5 grados). De ese modo, se supera la limitación asociada a la radiación isotrópica de agujeros pequeños.

El origen físico de este efecto de colimación —la creación de un haz estrecho— reside en los plasmones superficiales. Parte de la luz que emerge por el agujero se emite directamente, pero otra parte importante es transportada por los plasmones superficiales hasta las trincheras. Estas reemiten la luz, produciéndose un fenómeno de interferencia entre la emisión primaria del agujero central y la secundaria, proveniente de las trincheras. Se trata de una interferencia constructiva en ciertas direcciones, dando lugar a la aparición de un haz de luz muy colimado, como se observa en la figura 2b. Variando los parámetros geométricos que definen la estructura —la distancia entre

las trincheras y su profundidad— podemos elegir los colores preferentemente emitidos y las direcciones en que se emiten.

Al librarse la plasmónica de las limitaciones debidas a la baja transmisión y la radiación isotrópica, resultan posibles nuevas aplicaciones. Entre ellas figuraría la escritura en regiones menores que la longitud de onda, sea para un almacenamiento óptico de más alta densidad (más información en menos espacio), sea para miniaturizar circuitos integrados mediante litografía óptica de mayor resolución. Asimismo, poder dirigir luz de diferentes colores por diferentes direcciones mediante una lámina metálica de reducidas dimensiones sería de gran ayuda en el diseño de nuevos dispositivos ópticos. Todas estas aplicaciones quizás aparezcan en un futuro más o menos cercano. NEC ya ha desarrollado el fotodetector más rápido del mundo, que tiene forma de “ojo de buey” y se basa en los plasmones superficiales, que

operan como “embudos” para la luz, conforme a la física que hemos descrito aquí.

### Sensores moleculares

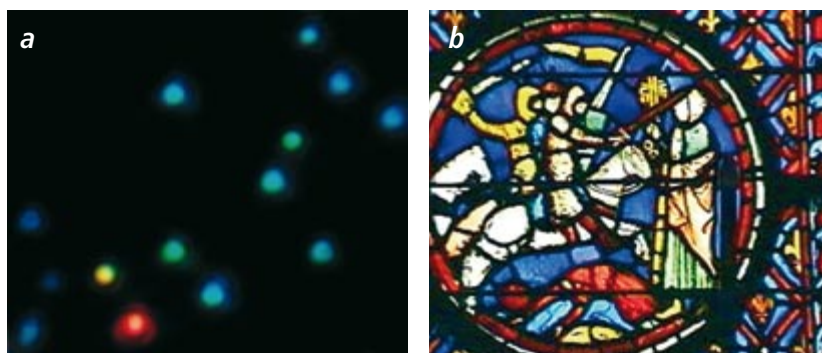
Sin duda alguna, la aplicación principal de los plasmones superficiales reside hoy en el campo de los sensores moleculares. Existen ya sensores comerciales basados en la “resonancia de plasmones superficiales”. La idea de estos sensores es muy simple. Debido a su fuerte confinamiento en la superficie del metal, los plasmones superficiales se muestran muy sensibles a la presencia de moléculas adsorbidas en la superficie. Un esquema del funcionamiento de estos aparatos se encuentra en el recuadro “Resonancia de plasmones superficiales”. Se deposita sobre un prisma de vidrio una fina lámina de metal (de oro, por lo común), de un grosor de alrededor de 50 nm. Se hace incidir luz desde la región del prisma y se va variando el ángulo de incidencia. Generalmente, la intensidad de la luz reflejada no depende del ángulo de incidencia; mas, para un determinado ángulo, se dan las condiciones necesarias (coincidencia del momento de la

El objetivo último de los sensores moleculares sería poder detectar la presencia de una molécula y sus propiedades. Los plasmones superficiales tienen también una función muy importante en esta tarea, que actualmente se halla en fase de investigación básica, pero de la que cabe esperar que se comercialice en un futuro no muy lejano. Los plasmones que intervienen aquí no son los plasmones viajeros de los que hemos venido hablando, sino los plasmones localizados que aparecen en partículas metálicas. Cualquier superficie metálica (plana, esférica, cilíndrica o de cualquier otra forma) posee plasmones superficiales. En partículas metálicas, la longitud de onda a la que existen estos plasmones localizados depende del tipo de metal, del tamaño de la partícula y de la forma de ésta. Para esas longitudes de onda, el campo electromagnético se localiza alrededor de la superficie del metal. Cuando luz con longitud de onda igual a la de los plasmones localizados incide sobre la partícula metálica, se produce un efecto resonante, que lleva asociado un aumento enorme de la intensidad del campo electromagnético en las proximidades de la partícula (por comparación con la intensidad de la luz incidente).

Este fenómeno se aprovecha desde hace siglos para la fabricación de vidrieras. En ellas, algunos colores vienen determinados por la presencia de nanopartículas de oro, o plata, en el interior del vidrio. De la luz blanca que incide sobre la vidriera, nos llega más intensidad en los colores que no son absorbidos por las resonancias plasmónicas de las nanopartículas. Por ejemplo, en la figura 3a el color rojo asociado a alguna de las nanopartículas se debe a que éstas absorben preferentemente luz de color azul y amarillo. A diferencia de los pigmentos utilizados en pintura, las nanopartículas metálicas no se degradan cuando se las ilumina, gracias a lo cual percibimos hoy en día los colores de las vidrieras tal y como se veían cuando las colocaron hace siglos.

Mediante estas resonancias plasmónicas es como se pretende detectar moléculas individualmente. Para ello se recurre a la espectroscopia Raman, así llamada en honor del científico indio que en 1928 descubrió el fenómeno físico en que se basa. Cuando un haz de luz incide sobre una molécula, parte de esa luz se dispersa, y parte es reemitida por la molécula. El espectro de emisión de la molécula (es decir, cómo depende la intensidad de la luz emitida con la longitud de onda) difiere de una molécula a otra; podemos, pues, identificarlas.

Podemos decir que el espectro Raman de una molécula es como su huella dactilar. La cantidad de luz reemitida por la molécula es proporcional al cuadrado de la intensidad del campo eléctrico



**3. PLASMONES LOCALIZADOS Y VIDRIERAS.** En el panel (a) se muestra una imagen obtenida mediante una cámara electrónica (Nikon Coolpix 950) de un conjunto de nanopartículas de plata, tal y como se ven en un microscopio de campo oscuro. El tamaño de las partículas es de 40-120 nm. Los colores diferentes corresponden a distintas formas de las partículas. La partícula roja corresponde a una forma triangular, mientras que las pentagonales aparecen con un color verde. El color azul de alguna de las partículas se debe a su esfericidad. (b) Vidriera del siglo XIV cuyo color rojo se explica por la presencia de nanopartículas de oro en el interior del vidrio.

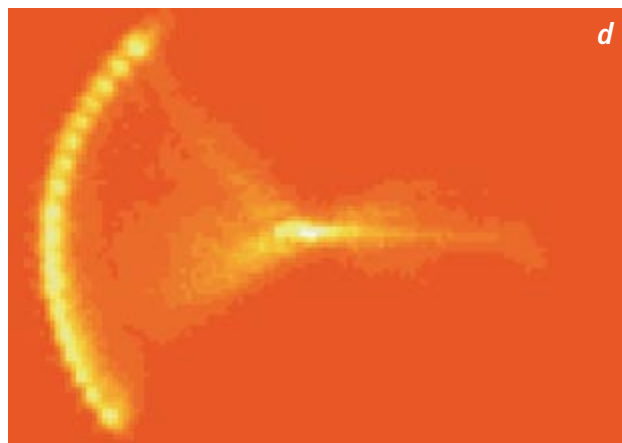
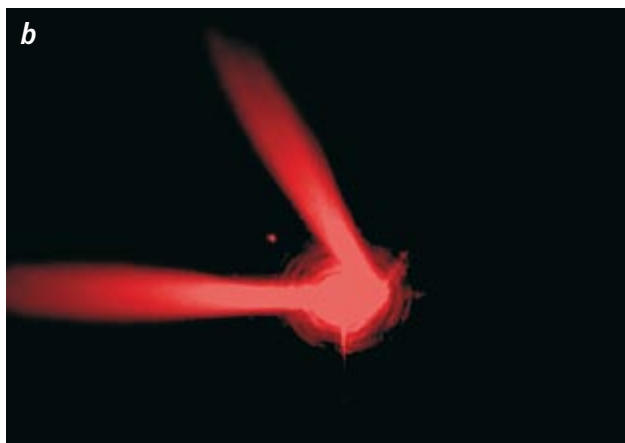
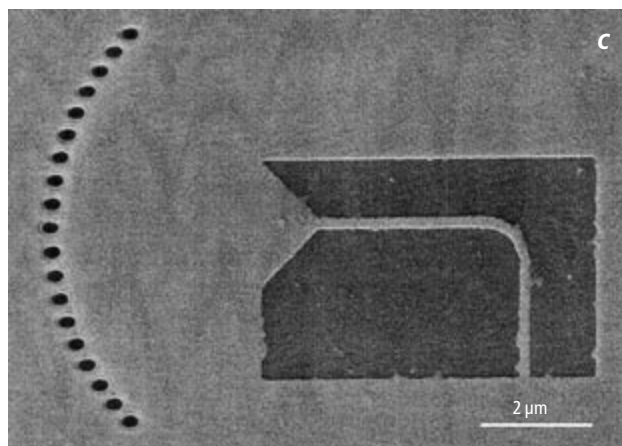
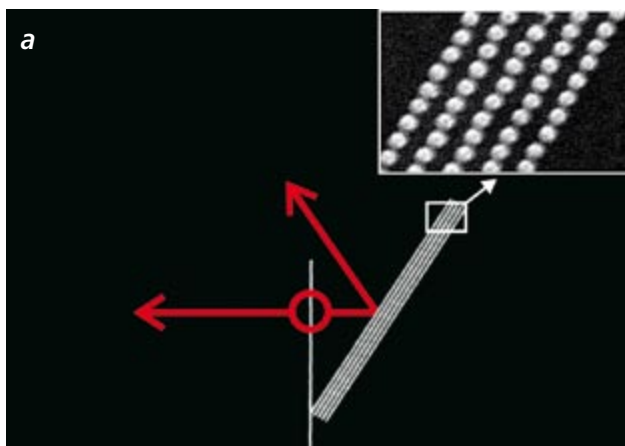
luz incidente en la dirección de la superficie y del momento del plasmón superficial) para que se transfiera energía de la luz al plasmón. En ese caso, el plasmón, al generarse, absorbe parte de la energía, reduciéndose la intensidad de la luz reflejada, lo que se mide con una cámara digital de elevadísima resolución espacial y temporal.

Tanto el valor del ángulo al que se produce el mínimo de reflexión como el rango de ángulos en el que la reflexión se reduce, dependen del tipo de material que se halla en contacto con el metal. Calibrando adecuadamente el dispositivo, el análisis de la intensidad reflejada como función del ángulo de incidencia nos aporta información sobre las moléculas cercanas a la superficie, lo que tiene gran interés en química y en biología. Con esta técnica es posible incluso estudiar la evolución temporal de diversas reacciones químicas sobre la superficie.

## OPTICA EN DOS DIMENSIONES

Se presentan aquí dos ejemplos de cómo se puede hacer óptica en el plano con plasmones superficiales. En el panel (a) se muestra una imagen de un *espejo* para plasmones obtenida mediante microscopio electrónico. El espejo consta de cinco hileras de cadenas de nanopartículas de oro de 140 nm de diámetro y una altura de 70 nm. La distancia entre partículas es de 220 nm. La imagen de fluorescencia que aparece en el panel (b) manifiesta que el plasmón que se propaga de izquierda

a derecha se refleja por entero al incidir sobre el conjunto de las nanopartículas. El panel (c) ofrece una imagen, de microscopio electrónico, de una *lente* para plasmones: 19 agujeros (200 nm de diámetro) dispuestos en una semicircunferencia de radio 5  $\mu\text{m}$  se perforan en una lámina de oro. En el panel (d) se observa que los plasmones (generados mediante luz con longitud de onda de 532 nm) que emergen por los agujeros se enfocan en el centro de la circunferencia.



en la posición en la que se encuentra la molécula y al tamaño de ésta. Puesto que hablamos de un tamaño muy pequeño, la señal Raman de una molécula apenas si se detecta, aun cuando se ilumine con láseres muy potentes.

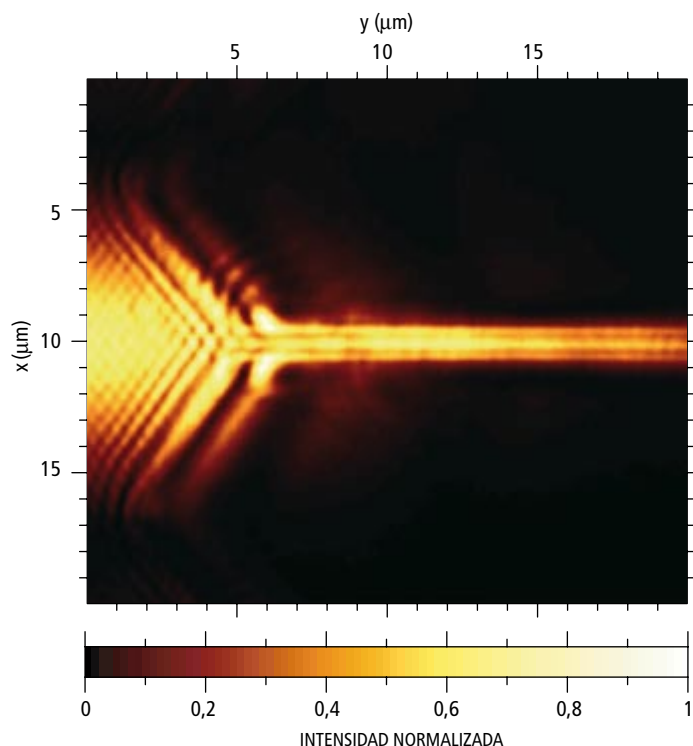
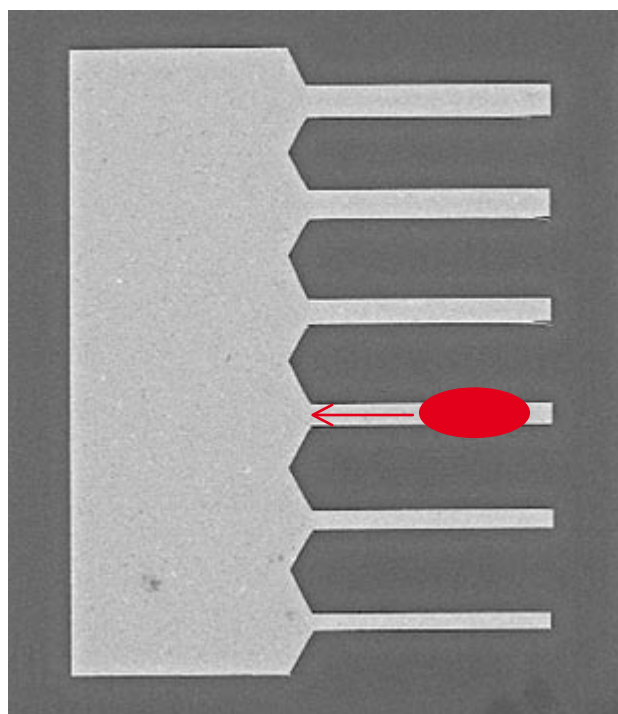
En condiciones normales, para detectar un tipo de molécula mediante un espectro Raman se requiere la presencia de más de un trillón de moléculas. Sin embargo hace 30 años se descubrió que, cuando las moléculas están adsorbidas sobre la superficie de partículas nanométricas metálicas (por lo general de oro o plata), la señal Raman aumentaba en un factor que a veces llegaba a ser de entre 10 y 15 órdenes de magnitud.

La razón de tal aumento se encuentra en la excitación por parte de la luz incidente de los plasmones superficiales. Dicha excitación provoca que el campo eléctrico que siente la

molécula sea mucho mayor que el asociado a la luz incidente. Este aumento extraordinario de la señal ha permitido abordar el estudio del espectro Raman de una molécula adsorbida sobre un conjunto de nanopartículas metálicas. En el sistema formado, el acoplo electromagnético entre las nanopartículas hace que el campo eléctrico sea, en la región de contacto entre las mismas, mucho mayor que el asociado a una partícula; resulta entonces posible el análisis espectroscópico de una sola molécula adsorbida en esa región.

A veces una molécula puede presentarse con varias geometrías. Y puesto que la capacidad de absorber radiación de las moléculas depende de su forma, la evolución temporal del espectro Raman nos dará incluso una idea de cómo y cada cuánto cambia una molécula de una geometría a otra. Un conocimiento imprescindible





**4. GUIA DE ONDAS PARA PLASMONES.** En el panel de la izquierda se muestra una imagen, tomada por un microscopio electrónico, de una lámina de oro de 40 nm de espesor en la que se ha hecho que crezcan cintas del mismo material con un ancho 2,5  $\mu\text{m}$ . La funcionalidad óptica de estas guías de onda se ilustra en la imagen de la derecha, que se ha obtenido mediante microscopía de campo cercano; el procedimiento mide la intensidad del campo eléctrico en la vecindad de la superficie. El plasmón, generado en la zona roja, se introduce en una de las guías y se propaga a lo largo de la misma. Según se aprecia en la figura, el campo eléctrico queda confinado dentro de las cintas de oro, si bien su intensidad va decayendo a medida que se propaga por la cinta.

para entender reacciones químicas, como las que ocurren sin cesar en nuestro organismo. En la actualidad, la búsqueda de la forma que debe tener una superficie metálica para conseguir espectros Raman aún más intensos sigue siendo un activo campo de investigación; esa búsqueda concierne al perfil que ha de tener el metal, la naturaleza de las nanopartículas depositadas, la distancia que debe haber entre ellas, amén de otros.

### Óptica en dos dimensiones y circuitos plasmónicos

La aplicación técnica que genera mayores expectativas entre quienes estudian los plasmones superficiales son los circuitos ópticos plasmónicos. Los plasmones viajan en una superficie plana a velocidades próximas a las de la luz. Por tanto, los circuitos ópticos miniaturizados serían mucho más rápidos que los circuitos electrónicos ordinarios. Presentarían la ventaja adicional de que podrían transportarse señales ópticas, eléctricas o ambas según conviniera, toda vez que por la superficie de un metal pueden fluir también corrientes eléctricas.

Además, los circuitos plasmónicos serían compatibles con la técnica electrónica disponible, basada en el crecimiento epitaxial (sobre un sustrato de estructura cristalina afín) de metales y semiconductores. Mas, para que estas expectativas se cumplan, habría que mejorar nuestra capacidad de controlar la propagación de los plasmones superficiales. La característica fundamental que permite alterar el movimien-

to de los plasmones es que, al estar confinados en las superficies metálicas, los PS se ven muy afectados por cualquier modificación de la superficie que encuentren a su paso. Hay decenas de grupos en todo el mundo que se afanan por desentrañar la modificación necesaria de las superficies metálicas para controlar el *flujo* de los plasmones superficiales.

Una de las líneas de trabajo es la creación de elementos ópticos básicos para los plasmones superficiales, es decir, lentes y espejos, como los que modifican la propagación de la luz normal en tres dimensiones. Ya se han elaborado algunos de estos elementos. En la figura a del recuadro "Óptica en dos dimensiones" se muestra un espejo para plasmones superficiales, diseñado y construido por el grupo que Joachim Krenn dirige en la Universidad de Graz. Este espejo consta de 5 hileras de nanopartículas de oro (de dimensiones del orden de 0,04  $\mu\text{m}$ ) dispuestas periódicamente sobre una superficie de oro. La distancia entre hileras y entre partículas está elegida de modo que un plasmón con longitud de onda de 0,75  $\mu\text{m}$  se refleje totalmente al incidir sobre la estructura.

Por su parte, otro grupo experimental, del estadounidense Laboratorio Nacional de Argonne, ha diseñado una *lente* para plasmones (véase la figura c del recuadro "Óptica en dos dimensiones"), donde la luz incide sobre un conjunto de 19 agujeros perforados en una lámina de plata. Estos agujeros forman una estructura de media luna con un radio de 5  $\mu\text{m}$ , de manera que los PS que emergen

por los agujeros se enfocan en una región de dimensiones del orden de tan sólo  $0,1 \mu\text{m}$ , mucho menores que la longitud de onda de la luz incidente, que es de  $0,53 \mu\text{m}$ .

Para crear verdaderos circuitos plasmónicos, los plasmones superficiales deben confinarse no sólo en la dirección perpendicular a la superficie, sino también lateralmente, en la superficie misma. Se trata de lograr que la luz en forma de plasmón superficial se propague con dimensiones laterales del orden de, idealmente, 1 micra. La forma más natural de conseguirlo consistiría en reducir la dimensión lateral del *conducto* metálico por el que viaja el PS (véase la figura 4). Pero la investigación experimental ha demostrado que, al reducir la dimensión lateral, se reducen drásticamente las distancias que

recorren los PS antes de ser absorbidos (sus “longitudes de propagación”).

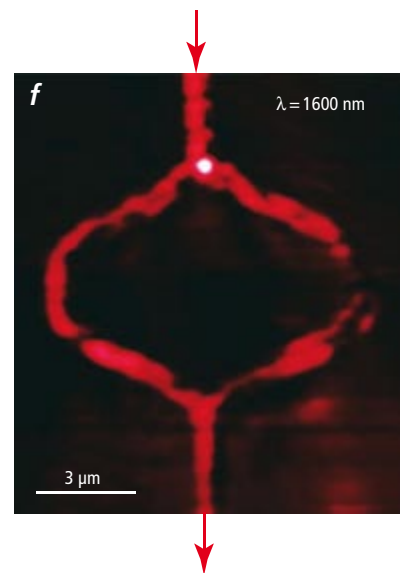
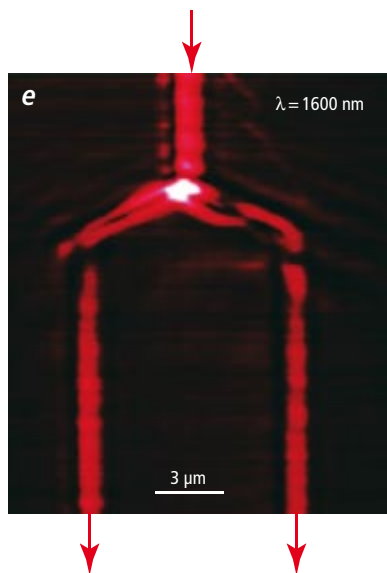
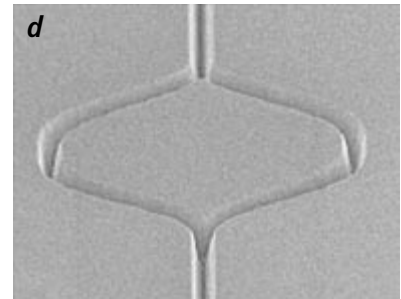
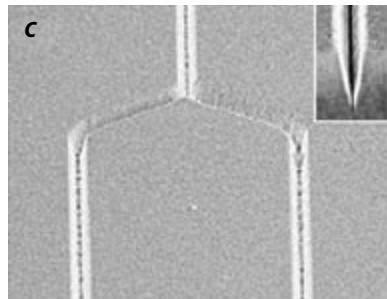
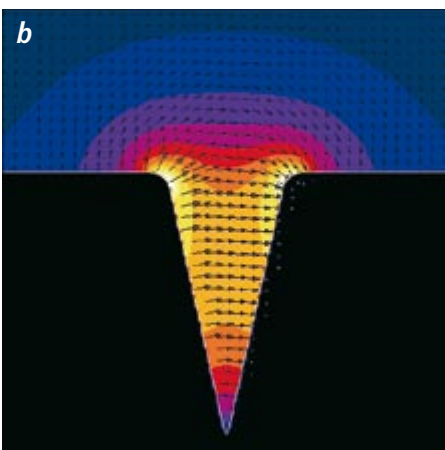
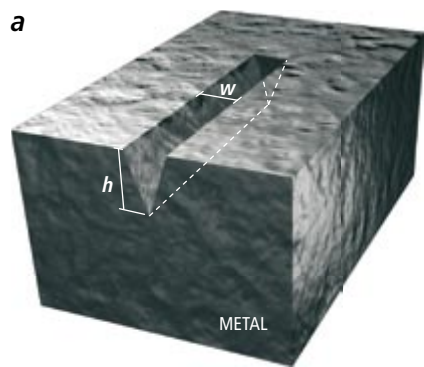
Como dijimos anteriormente, en una superficie plana bidimensional esa longitud de propagación puede ser de  $100 \mu\text{m}$ . Sin embargo, si la guía metálica tiene una anchura de  $1 \mu\text{m}$ , los plasmones con longitudes de onda en el rango óptico presentarán longitudes de propagación del orden de sólo  $3 \mu\text{m}$  que, al equivaler a sólo a 4-5 longitudes de onda, resultan insuficientes para crear circuitos plasmónicos eficientes.

Hasta hace un par de años se habían intentado diversas estrategias para confinar lateralmente los plasmones superficiales, pero en todos los casos el compromiso entre confinamiento lateral y longitud de propagación de los PS había resultado bastante insatisfactorio.

## LUZ QUE SE PROPAGA POR CANALES

En el panel (a) se muestra un esquema de un canal en forma de V perforado en una lámina de metal. El estricto confinamiento a que da lugar la excitación de un plasmón superficial de canal se ilustra en el panel (b), que manifiesta la amplitud del campo eléctrico para una longitud de onda de  $1,4 \mu\text{m}$  en un canal cuya profundidad es de  $1,2 \mu\text{m}$  y que tiene una anchura de  $0,5 \mu\text{m}$ . En el panel (c) se presenta una imagen de microscopio electrónico de un divisor de haces Y, en el que los brazos de la estructura están constituidos por

canales en forma de V (*panel superior derecho*). La imagen (e) aporta un plasmón superficial de canal de longitud de onda de  $1,6 \mu\text{m}$  que se propaga a lo largo del divisor. (Esta imagen ha sido obtenida mediante un microscopio de campo cercano.) En los paneles (d) y (f) se ve una imagen de microscopio electrónico de un interferómetro Mach-Zehnder y una imagen del plasmón superficial de canal que recorre la estructura, respectivamente. La longitud de onda en este caso también es de  $1,6 \mu\text{m}$ .



## Plasmones superficiales de canal

La situación cambió en 2005, cuando el grupo dirigido por Sergey Bozhevolnyi, de la Universidad de Aalborg, consiguió abordar experimentalmente los “plasmones superficiales de canal” y medir sus propiedades. Este tipo de plasmones existe dentro de canales en forma de V horadados en la superficie plana de un metal (véase el recuadro “Luz que se propaga por canales”). Pese a su notable grado de confinamiento, su longitud de propagación es comparable a la que corresponde a los plasmones de una superficie plana. Dependiendo del ángulo que define la V y de la profundidad de ésta, pueden aparecer distintos plasmones de canal, que se propagan a diferentes alturas de la V.

Diseñando de modo adecuado la forma del canal —lo que requiere complejos cálculos numéricos— se consigue que sólo exista un modo plasmónico dentro del canal. Habrá así una relación biunívoca entre longitud de onda y velocidad de propagación del plasmón. Una propiedad ésta muy importante en los circuitos ópticos. En efecto, si a una longitud de onda determinada hubiese más de un modo, la luz podría *saltar* de un modo a otro mientras se propaga; la señal luminosa se distorsionaría. Lo mismo le ocurriría a la información asociada a la señal.

Más sorprendente aún es la capacidad de estos plasmones de canal de girar en espacios reducidísimos. En los circuitos ópticos tradicionales, por ejemplo los creados con fibras ópticas, para evitar pérdidas por radiación, la variación de la dirección de la luz se ha de hacer sobre distancias de centenares de longitudes de onda, lo que dificulta la miniaturización de los circuitos. Sin embargo, la computación llevada a cabo por el grupo de David Pile en la Universidad Tecnológica de Queensland, mostró que los plasmones superficiales de canal toman una curva de 90 grados en un espacio de tan sólo 2 o 3 longitudes de onda, sin pérdida apreciable de intensidad.

Todas estas propiedades han sido ya corroboradas experimentalmente. Mediante el bombardeo de una lámina metálica con haces focalizados de iones, que, al chocar con ella, le van desprendiendo átomos de una forma controlada, se crearon canales de una anchura de 0,5  $\mu\text{m}$  y una profundidad de 1  $\mu\text{m}$ . Acoplándolos a fibras ópticas ordinarias, por las que se propagaba radiación electromagnética de  $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$ , se generaron plasmones superficiales de canal de esa misma longitud de onda, de gran interés en el campo de las telecomunicaciones.

La propagación del plasmón a lo largo del canal se visualizó mediante un microscopio

óptico de campo cercano. En este tipo de instrumento, una fuente de luz nanoscópica, generalmente una punta de fibra óptica con una apertura de menos de 100 nm, barre la superficie de la muestra en la región llamada campo óptico cercano, donde los tamaños son inferiores a la longitud de onda de la luz empleada.

Se comprobó que, según la teoría predecía, la luz estaba confinada en una dimensión lateral de alrededor de 1  $\mu\text{m}$  (dos veces el ancho del canal) y que, a su vez, la longitud de propagación era de 100  $\mu\text{m}$ .

Asimismo, se han construido los primeros dispositivos ópticos basados en las propiedades de los plasmones de superficie de canal. El primero de ellos es un “divisor de haz Y”, en el que un canal se separa en dos, formando una estructura con la forma de la letra Y. Se ha comprobado experimentalmente que la intensidad de plasmones superficiales de canal en la base de la letra se divide en dos, fluyendo cada mitad por cada una de las dos ramas de la bifurcación, sin pérdida significativa de luz en la unión.

También se ha fabricado un interferómetro Mach-Zehnder mediante la unión de dos divisores Y. En este dispositivo se hace interferir la luz consigo misma bifurcándola primero y reuniéndola de nuevo. Hoy en día, y a pesar de su corta historia, parece claro que las posibilidades que ofrecen los plasmones superficiales de canal son enormes. Son excelentes candidatos a formar parte de los circuitos fotónicos futuros.

## Un futuro brillante

No parece aventurado predecir que, en un futuro más o menos cercano, aparecerán nuevas aplicaciones fundadas en las propiedades especiales de los plasmones superficiales. En Europa, EE.UU. y Asia están en marcha numerosas iniciativas que coordinan los esfuerzos de diversos laboratorios para explotar las enormes potencialidades de los plasmones. Aunque la física es ciencia exacta, nunca se sabe con precisión cuáles de las propiedades fundamentales, que se estudian y entienden desde un punto de vista básico, darán lugar a aplicaciones prácticas con un impacto social y económico. En cuanto a los plasmones superficiales, puede que sus aplicaciones futuras vayan en la línea aquí adelantada o que evolucionen hacia terrenos que ni sospechamos.

En cualquier caso, el conocimiento acumulado sobre los plasmones superficiales durante los últimos años se añadirá a la larga lista de hallazgos y fenómenos descubiertos en el fascinante campo de la óptica durante los últimos siglos.

## Bibliografía complementaria

EXTRAORDINARY OPTICAL TRANSMISSION THROUGH SUB-WAVELENGTH HOLE ARRAYS. T. W. Ebbesen, H. J. Lezec, H. F. Ghaemi, T. Thio y P. A. Wolff en *Nature*, vol. 391, págs. 667–669; 1998.

BEAMING LIGHT FROM A SUBWAVELENGTH APERTURE. H. J. Lezec, A. Degiron, E. Devaux, R. A. Linke, L. Martín Moreno, F. J. García Vidal y T. W. Ebbesen en *Science*, vol. 297, págs. 820–822; 2002.

TWO-DIMENSIONAL OPTICS WITH SURFACE PLASMON POLARITONS. H. Ditlbacher, J. R. Krenn, G. Schider, A. Leitner y F. R. Aussenegg en *Applied Physics Letters*, vol. 81, págs. 1762–1764; 2002.

MIMICKING SURFACE PLASMONS WITH STRUCTURED SURFACES. J. B. Pendry, L. Martín Moreno y F. J. García Vidal en *Science*, vol. 305, págs. 847–848; 2004.

CHANNEL PLASMON SUBWAVELENGTH WAVEGUIDE COMPONENTS INCLUDING INTERFEROMETERS AND RING RESONATORS. Sergey I. Bozhevolnyi, Valentyn S. Volkov, Eloise Devaux, Jean-Yves Laluet y Thomas W. Ebbesen en *Nature*, vol. 440, págs. 508–511; 2006.