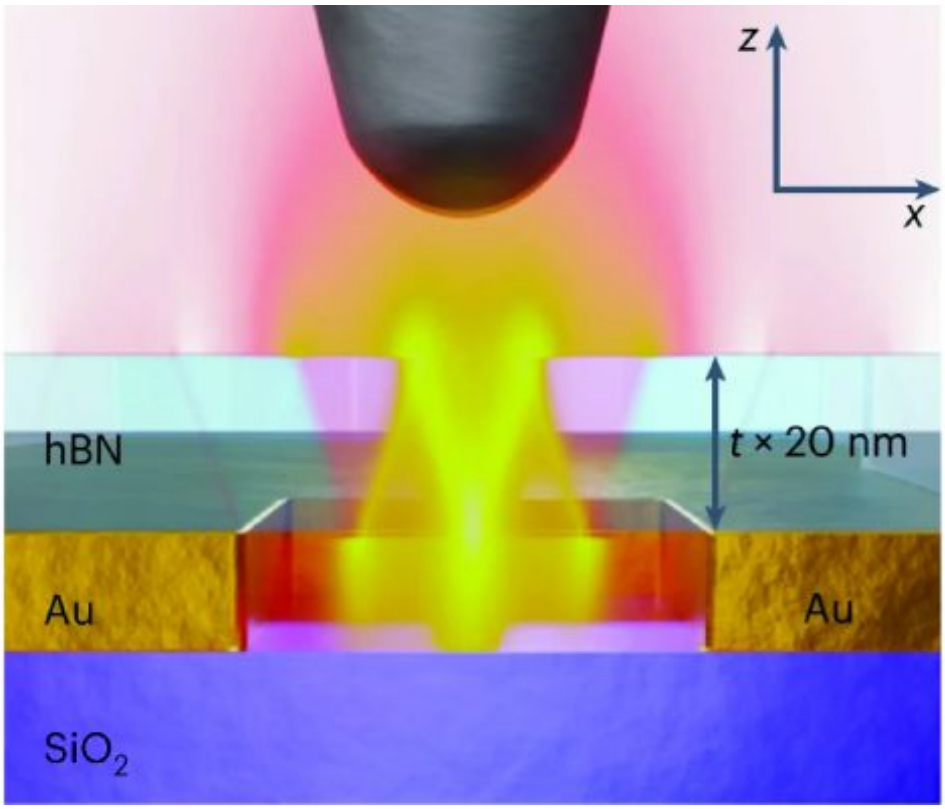


Rompiendo fronteras en fotonica cuantica: unas nanocavidades nuevas amplian las fronteras en el confinamiento de la luz

En un importante avance para la nanofotonica cuantica, un equipo de fisicos europeos e israelies ha introducido un nuevo tipo de cavidades polaritonicas y redefinido los limites del confinamiento de la luz. Este trabajo pionero, publicado en Nature Materials, propone un metodo no convencional para confinar fotones, superando las limitaciones tradicionales de la nanofotonica y logrando simultaneamente cavidades de pequeno volumen y larga durabilidad.

February 12, 2024

Los fisicos llevan mucho tiempo buscando formas de forzar los fotones a ocupar volumenes cada vez mas pequenos. La escala de longitud natural del foton es la longitud de onda y cuando un foton es forzado a entrar en una cavidad mucho mas pequena que su longitud de

onda, en la practica se vuelve mas "concentrado". Esta concentracion mejora las interacciones con los electrones, amplificando los procesos cuanticos dentro de la cavidad. Sin embargo, a pesar del inmenso exito experimental de las ultimas decadas, el efecto de la disipacion (absorcion optica) sigue siendo un obstaculo importante a la hora de confinar la luz a volumenes extremadamente pequenos. Los fotones en las nanocavidades se absorben muy rapidamente, a menudo incluso antes de que el foton llegue desde un lado de la cavidad a otro. Esta disipacion limita la aplicabilidad de las nanocavidades a algunas de las areas mas interesantes de la electrodinamica cuantica.

El grupo de investigacion del Prof. **ICREA Frank Koppens** del ICFO ha publicado un estudio en Nature Materials donde superan este desafio creando cavidades potenciadas multimodales (en ingles multimodal-enhanced cavities o MEC) con una combinacion incomparable de volumen por debajo de la longitud de onda y vida util prolongada. Estas nanocavidades, que miden menos de 100x100 nm² de area y solo 3 nm de grosor, confinan l luz durante periodos significativamente mas largos. La clave radica en el uso de polaritone de fonones hiperbolicos, excitaciones electromagneticas unicas nativas de los materiales 2 utilizados para formar la cavidad. Estos polaritones hiperbolicos son similares a la lu ordinaria en la mayoria de los aspectos, pero pueden confinarse a volumene extremadamente pequenos (mucho mas pequenos que la longitud de onda elevada al cubo de maneras que desafian la intuicion comun en optica

Cuando los experimentos superaron las expectativas teoricas

Este descubrimiento comenzo con una observacion casual realizada durante un proyecto completamente diferente. Mientras utilizaban un microscopio optico de campo cercano para caracterizar la estructura de un material 2D, los investigadores notaron una reflexion inusualmente fuerte cuando los polaritones excitados dentro suyo golpeaban el borde de un sustrato metalico. Esta observacion inesperada, a primera vista anecdotica, resulto ser el principio subyacente de un dispositivo innovador.

Los investigadores se dieron cuenta de que podrian utilizar esta propiedad recien descubierta para crear nanocavidades de alta calidad y volumen pequeno simultaneamente, un logro que hasta ahora eludia a la comunidad de la nanofotonica. Ellos esperaban obtene una ligera mejora con respecto a las nanocavidades anteriores, pero al analizar la mediciones experimentales el equipo se llevo una gran sorpresa. El rendimiento de la cavidades duplico sus expectativas, superando el maximo previsto por el modelo teoric inicial. Aun mejor, las nanocavidades mostraron estas vidas relativamente largas a pesar d su tamano reducido (del orden de unos pocos nanometros)

"Las mediciones experimentales suelen ser peores de lo que sugeriria la teoria, pero en est caso descubrimos que los experimentos superaban las optimistas predicciones de nuestr teoria simplificada", dijo el primer autor, el Dr. Hanan Herzig Sheinfux, del Departamento d Fisica de la Universidad Bar-Ilan. "Este exito inesperado allana el camino hacia nueva

aplicaciones y avances en la fotonica cuantica, ampliando los limites de lo que pensabamo que era posible"

De hecho, sus cavidades MEC eran ordenes de magnitud mas pequenas que las de cualquie otro resonador optico de vida comparable. Sin embargo, su enorme logro se convirti tambien en su mayor desafio, ya que aun faltaba una explicacion teorica. Despues de mese de estudio, descubrieron que "una fisica realmente hermosa y sorprendentemente profund relacionada con la formacion de nanorayos y la interaccion multimodal era la responsable d todo", explica el Dr. Herzig

Cavidad potenciada multimodal de polaritones hiperbolicos?

El exito de sus nanocavidades se baso en un mecanismo de confinamiento unico, asi com en la construccion del dispositivo. Las nanocavidades se crearon perforando agujeros nanoescala en un sustrato de oro con la precision extrema (2-3 nanometros) de u microscopio enfocado de haz de iones de He. Despues de hacer los agujeros, se transfiri encima nitruro de boro hexagonal (hBN), un material 2D que puede admitir los polaritones d fonones hiperbolicos. La luz debia quedar confinada dentro del hBN, en la region situad encima de los agujeros

En el modelo original utilizado para analizar los experimentos, el confinamiento en la cavida se puede comparar con el aumento del trafico de automoviles que se produce cuando un autopista de doble carril se reduce a uno solo. La incompatibilidad entre el trafico de uno dos carriles esta obligando a los automoviles a congestionarse, lo que es vagamente similar como se refleja y confina la luz cuando el tipo de sustrato cambia en el borde del agujer dando paso al sustrato de oro. La incompatibilidad entre el hBN suspendido y el hBN sobr oro actua como un "cuello de botella" para los polaritones, de modo que la luz dentro de l cavidad tiene mas dificultades para filtrarse

Sin embargo, tal como se menciono anteriormente, este modelo simple no pudo explica completamente los resultados experimentales. Para hacerlo, hay que tener en cuenta que lo polaritones de hBN se manifiestan en forma de ondas de luz y que, a diferencia de la particulas clasicas (como los coches en una carretera), pueden combinarse e interferir d formas complicadas. En concreto, los polaritones hBN pueden combinarse en excitacione similares a rayos multimodales. Las excitaciones multimodales que se forman por encima d los nano-agujeros en el metal son incluso mas incompatibles con los polaritones fuera de agujero, lo que conlleva un grado de confinamiento aun mayor del que seria posible de otr manera

Fundamentalmente, este metodo evita dar forma directa al hBN y preserva su calida pristina, lo que permite fotones altamente confinados y de larga vida en la cavidad

El Prof. Koppens y el Dr. Herzig tienen la intencion de utilizar estas cavidades como un plataforma novedosa para experimentos cuanticos de interaccion luz-materia con el fin d ver efectos cuanticos que antes se consideraban imposibles, asi como para estudiar mas

fondo la fisica intrigante y contraintuitiva del comportamiento en polaritones de fonone hiperbolicos

Referencia bibliografica:?

Hanan Herzig Sheinfux et al, High-quality nanocavities through multimodal confinement o hyperbolic polaritons in hexagonal boron nitride,Nature Materials (2024). www.nature.com/articles/s41563-023-01785-w?