



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 práctica se vuelve más "concentrada". Esta concentración mejora las interacciones con los electrones, amplificando los procesos cuánticos dentro de la cavidad. Sin embargo, a pesar del inmenso éxito experimental de las últimas décadas, el efecto de la disipación (absorción óptica) sigue siendo un obstáculo importante a la hora de confinar la luz a volúmenes extremadamente pequeños. Los fotones en las nanocavidades se absorben muy rápidamente, a menudo incluso antes de que el fotón llegue desde un lado de la cavidad a otro. Esta disipación limita la aplicabilidad de las nanocavidades a algunas de las áreas más interesantes de la electrodinámica cuántica.

El grupo de investigación del Prof. **ICREA Frank Koppens** del ICFO ha publicado un estudio en *Nature Materials* donde superan este desafío creando cavidades potenciadas multimodales (en inglés multimodal-enhanced cavities o MEC) con una combinación incomparable de volumen por debajo de la longitud de onda y vida útil prolongada. Estas nanocavidades, que miden menos de 100x100 nm² de área y solo 3 nm de grosor, confinan la luz durante periodos significativamente más largos. La clave radica en el uso de polaritones de fonones hiperbólicos, excitaciones electromagnéticas únicas nativas de los materiales 2D utilizados para formar la cavidad. Estos polaritones hiperbólicos son similares a la luz ordinaria en la mayoría de los aspectos, pero pueden confinarse a volúmenes extremadamente pequeños (mucho más pequeños que la longitud de onda elevada al cubo de maneras que desafían la intuición común en óptica

Cuando los experimentos superaron las expectativas teóricas

Este descubrimiento comenzó con una observación casual realizada durante un proyecto completamente diferente. Mientras utilizaban un microscopio óptico de campo cercano para caracterizar la estructura de un material 2D, los investigadores notaron una reflexión inusualmente fuerte cuando los polaritones excitados dentro suyo golpeaban el borde de un sustrato metálico. Esta observación inesperada, a primera vista anecdótica, resultó ser el principio subyacente de un dispositivo innovador.

Los investigadores se dieron cuenta de que podrían utilizar esta propiedad recién descubierta para crear nanocavidades de alta calidad y volumen pequeño simultáneamente, un logro que hasta ahora eludía a la comunidad de la nanofotónica. Ellos esperaban obtener una ligera mejora con respecto a las nanocavidades anteriores, pero al analizar las mediciones experimentales el equipo se llevó una gran sorpresa. El rendimiento de las cavidades duplicó sus expectativas, superando el máximo previsto por el modelo teórico inicial. Aun mejor, las nanocavidades mostraron estas vidas relativamente largas a pesar de su tamaño reducido (del orden de unos pocos nanómetros)

"Las mediciones experimentales suelen ser peores de lo que sugeriría la teoría, pero en este caso descubrimos que los experimentos superaban las optimistas predicciones de nuestra teoría simplificada", dijo el primer autor, el Dr. Hanan Herzig Sheinfux, del Departamento de Física de la Universidad Bar-Ilan. "Este éxito 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 cualquier 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 meses de estudio, descubrieron que "una fisica realmente hermosa y sorprendentemente profunda relacionada con la formacion de nanorayos y la interaccion multimodal era la responsable de 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 como 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 un microscopio enfocado de haz de iones de He. Despues de hacer los agujeros, se transfirio encima nitruro de boro hexagonal (hBN), un material 2D que puede admitir los polaritones de fonones hiperbolicos. La luz debia quedar confinada dentro del hBN, en la region situada encima de los agujeros

En el modelo original utilizado para analizar los experimentos, el confinamiento en la cavidad 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 y 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 agujero dando paso al sustrato de oro. La incompatibilidad entre el hBN suspendido y el hBN sobre oro actua como un "cuello de botella" para los polaritones, de modo que la luz dentro de la cavidad tiene mas dificultades para filtrarse

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

Fundamentalmente, este metodo evita dar forma directa al hBN y preserva su calidad 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 una plataforma novedosa para experimentos cuanticos de interaccion luz-materia con el fin de 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?