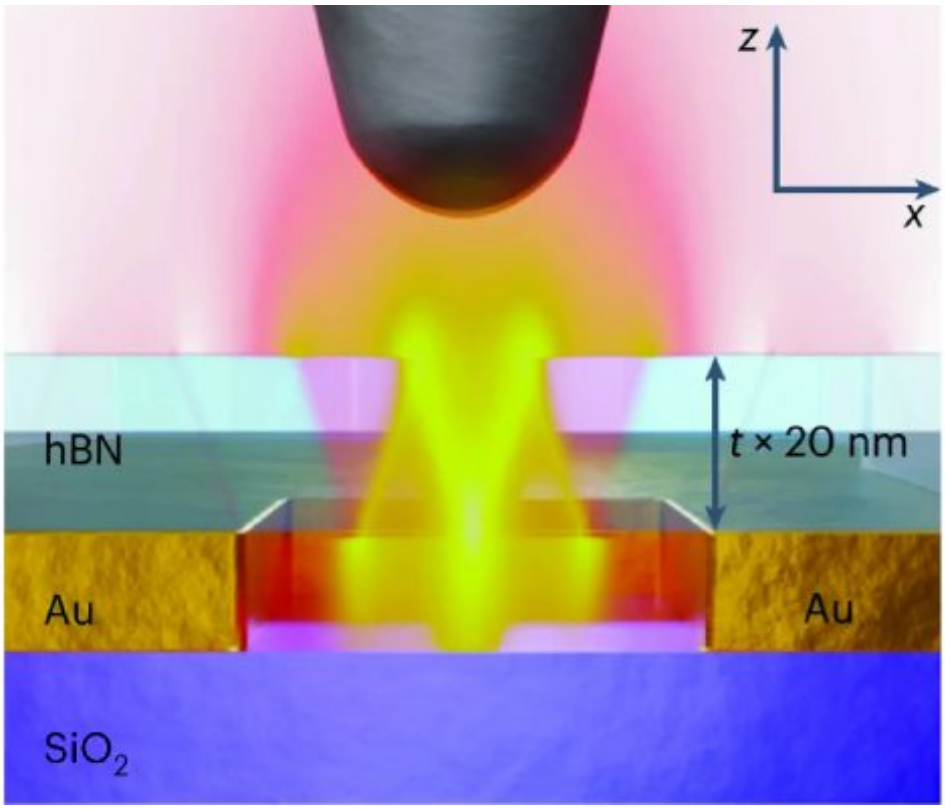

Trencant fronteres en fotonica quantica: unes nanocavitats noves amplien les fronteres en el confinament de la llum

En un important avenc per a la nanofotonica quantica, un equip de fisics europeus i israelians ha introduit un nou tipus de cavitats polaritoniques i ha redefinit els limits del confinament de la llum. Aquest treball pioner, publicat a Nature Materials, proposa un metode no convencional per confinar fotons, superant les limitacions tradicionals de la nanofotonica i aconseguint simultaniament cavitats de petit volum i llarga durabilitat.

February 12, 2024

Els fisics porten molt de temps buscant maneres de forcar els fotons a ocupar volums cada vegada mes petits. L'escala de longitud natural del foto es la longitud d'ona i quan un foto es forcat a entrar en una cavitat molt mes petita que la seva longitud d'ona, a la practica es torna mes i¿½concentrati¿½. Aquesta concentracio millora les interaccions amb els electr

ns, amplificant els processos quantics dins de la cavi
at. Tot i l'immens exit experimental de les darreres decades, l'efecte de la dissipacio (abso
cio optica) continua sent un obstacle important a l'hora de confinar la llum a vo
ums extremadament petits. Els fotons a les nanocavitats s'absorbeixen molt rapidament, so
int fins i tot abans que el foto arribi des d'una banda de la cavitat a l'altra. Aquesta dissip
cio limita l'aplicabilitat de les nanocavitats a algunes de les arees mes interessant
de l'electrodinamica quant
ca. El grup de recerca del P**ICREA Frank Koppens** de l'ICFO ha publicat un estudi a Nature Materials on superen aquest desafiament creant cavitats potenciades multimodals (en angles multimodal-enhanced cavities o MEC) amb una combinacio incomparable de volum per sota de la longitud d'ona i vida util ampliada. Aquestes nanocavitats, que fan menys de 100x100 nm² d'area i nomes 3 nm de gruix, confinen la llum durant periodes significativament me
llargs. La clau radica en l'us de polaritons de fonons hiperbolics, excitacion
electromagnetiques uniques natives dels materials 2D utilitzats per formar la cavitat. Aquest
polaritons hiperbolics son similars a la llum ordinaria en la majoria dels aspectes, pero e
poden confinar a volums extremadament petits (molt mes petits que la longitud d'on
elevada al cub) de maneres que desafien la intuicio comuna en optica

Quan els experiments van superar les expectatives teoriques

Aquest descobriment va comencar amb una observacio casual realitzada durant un projecte completament diferent. Mentre feien servir un microscopi optic de camp proper per caracteritzar l'estructura d'un material 2D, els investigadors van notar una reflexio inusualment forta quan els polaritons excitats dins seu colpejaven la vora d'un substrat metal·lic. Aquesta observacio inesperada, a primer cop d'ull anecdotica, va resultar ser e
principi subjacent d'un dispositiu innovador
Els investigadors es van adonar que podrien utilitzar aquesta propietat acabada de descobri
per crear nanocavitats d'alta qualitat i volum petit simultaniament, un exit que fins ara eludi
a la comunitat de la nanofotonica. Ells esperaven obtenir una lleugera millora respecte a le
nanocavitats anteriors, pero en analitzar les mesures experimentals l'equip es va emporta
una gran sorpresa. El rendiment de les cavitats va duplicar les expectatives i va superar e
maxim previst pel model teoric inicial. Encara millor, les nanocavitats van mostrar aqueste
vides relativament llargues malgrat la mida reduida (de l'ordre d'uns quants nanometres)
"Les mesures experimentals solen ser pitjors del que suggeriria la teoria, pero en aquest ca
vam descobrir que els experiments superaven les optimistes prediccions de la nostra teori
simplificada", va dir el primer autor, el Dr. Hanan Herzig Sheinfux, del Departament de Fisic
de la Universitat Bar-Ilan. "Aquest exit inesperat aplana el cami cap a noves aplicacions
avencos en la fotonica quantica, ampliant els limits del que pensavem que era possible"
De fet, les seves cavitats MEC eren ordres de magnitud mes petites que les de qualsevol altr
ressonador optic de vida comparable. No obstant aixo, el seu enorme exit es va converti

tambe en el seu desafiament mes gran, ja que encara mancava una explicacio teorica Despres de mesos d'estudi, van descobrir que "una fisica realment bonica i sorprenentmen profunda relacionada amb la formacio de nanoraigs i la interaccio multimodal era l responsable de tot", explica el Dr. Herzig

Cavitat potenciada multimodal de polaritons hiperbolics?

L'exit de les seves nanocavitats es basava en un mecanisme de confinament unic, aixi com e la construccio del dispositiu. Les nanocavitats es van crear perforant forats a nanoescala e un substrat d'or amb la precisio extrema (2-3 nanometres) d'un microscopi enfocat de fei d'ions d'He. Despres de fer els forats, es va transferir a sobre nitrur de bor hexagonal (hBN) un material 2D que pot admetre els polaritons de fonons hiperbolics. La llum havia de queda confinada dins de l'hBN, a la regio situada damunt dels forats

En el model original utilitzat per analitzar els experiments, el confinament a la cavitat es po comparar amb l'augment del transit d'automobils que es produeix quan una autopista d doble carril es redueix a un de sol. La incompatibilitat entre el transit d'un i dos carrils est obligant els automobils a congestionar-se, cosa que es vagament similar a com es reflecteix confina la llum quan el tipus de substrat canvia a la vora del forat donant pas al substrat d'or La incompatibilitat entre l'hBN suspes i l'hBN sobre or actua com un i¿½coll d'ampollai¿? per als polaritons, de manera que la llum dins de la cavitat te mes dificultats per filtra -se. Tanmateix, tal com s'ha esmentat anteriorment, aquest model simple no va poder exp icar completament els resultats experimentals. Per fer-ho, cal tenir en compte que els polar tons d'hBN es manifesten en forma d'ones de llum i que, a diferencia de les particules class ques (com els cotxes en una carretera), poden combinar-se i interferir de formes complicade . En concret, els polaritons d'hBN es poden combinar en excitacions similars a raigs multimo als. Les excitacions multimodals que es formen per sobre dels nano-forats del metall son fins tot mes incompatibles amb els polaritons fora del forat, cosa que comporta un gr u de confinament encara mes gran del que seria possible d'una altra ma era. Fonamentalment, aquest metode evita donar forma directa a l'hBN i preserva la seva qua itat pristina, cosa que permet tenir fotons altament confinats i de llarga vida a la cav tat. El Prof. Koppens i el Dr. Herzig tenen la intencio d'utilitzar aquestes cavitats co una plataforma innovadora per a experiments quantics d'interaccio llum-materia per eure efectes quantics que abans es consideraven impossibles, aixi com per estudiar mes a fo s la fisica intrigant i contraintuitiva del comportament en polaritons de fonons hiperbo

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