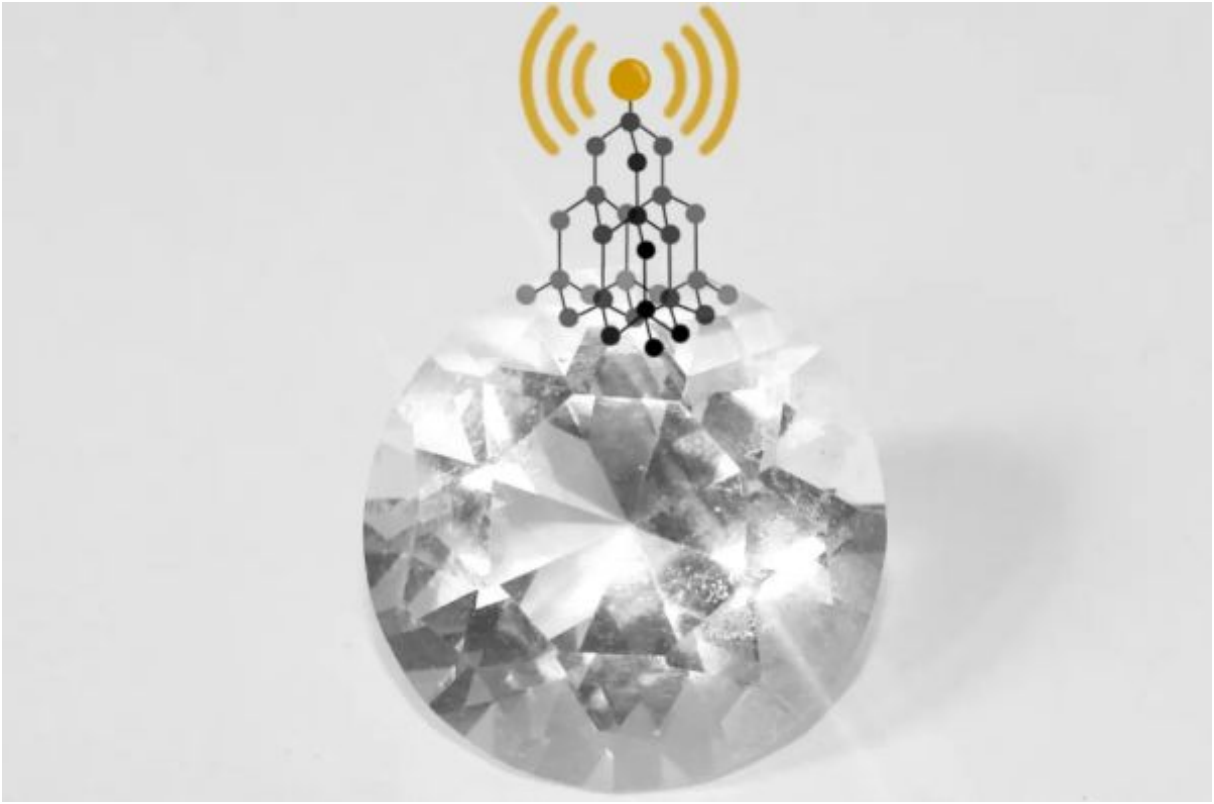

Defectos atomicos en diamantes desvelan una nueva clase de antenas opticas eficientes

Nuevas antenas opticas basadas en defectos atomicos en solidos aumentan hasta un millon de veces la intensidad del campo electromagnetico emitido a distancias cercanas. El estudio revela su notable capacidad para concentrar energia optica, detectar y manipular su entorno proximo.

June 17, 2024

Mas de un siglo despues de la invencion de las antenas de radio por Henrich Hertz, y en una era en la que la miniaturizacion de los dispositivos tecnologicos esta absolutamente extendida, es natural que haya surgido una version a nanoescala de las antenas convencionales.

Estas nanoantenas opticas, como se las llama, pueden concentrar una gran cantidad de energia optica radiativa, aumentando enormemente la intensidad de una senal electromagnetica. Esto es bastante analogo a como funcionan las antenas de radio, pero en

este caso operando a frecuencias mas altas y tamanos mucho mas pequenos.
Hoy en dia, estas nanoantenas se enfrentan a dos retos importantes. Para empezar, su miniaturizacion no puede lograr dimensiones arbitrariamente reducidas, ya que sufren grandes perdidas cuando se fabrican en tamanos nanometricos (una milmillonesima parte de un metro). Ademas, el hecho de que la antena este en estado solido puede perjudicar la senal, dadas las interacciones con fonones (excitaciones colectivas en solidos) u otras fluctuaciones que pueden limitar gravemente la eficiencia global.
Ahora, un equipo liderado por la Universidad de Chicago y con la contribucion del Laboratorio Nacional Argonne e investigadores del ICFO, el **Dr. Francesco Andreoli** y el **Prof. ICREA Darrick Chang**, ha informado en Nature Photonics sobre una nueva antena optica en un solido que sortea estos obstaculos. Proponen el uso de centros de color en diamantes, especificamente centros germanio-vacante (GeV), como **nanoantenas opticas quirurgicamente precisas (tanto espectral como espacialmente) y eficientes**.

Los centros germanio-vacante se convierten en nanoantenas opticas
Un centro de color es un defecto en el espaciado regular de los atomos dentro de un solido que absorbe y emite luz visible de un color particular o radiacion infrarroja o ultravioleta. Un centro germanio-vacante en un diamante es un caso particular de un centro de color, donde dos carbonos ausentes son reemplazados por un atomo de germanio.
El estudio presentado ha demostrado tanto teorica como experimentalmente que los GeV, cuando se iluminan con luz de una frecuencia particular (la frecuencia de resonancia), pueden funcionar como antenas eficientes. Mas importante aun, estas muestran un aumento de hasta un millon de veces en la intensidad del campo cercano (es decir, de la senal emitida o absorbida a distancias cortas).
Ademas, demostraron que los GeV se pueden utilizar tanto para la manipulacion activa como para la deteccion de su entorno proximo, lo que demuestra el poder de estas novedosas nanoantenas y sus propiedades unicas.

Arrojando luz sobre las fluctuaciones de carga en las vacantes cercanas
En este tipo de materiales, puede suceder, por casualidad, que se creen otras vacantes (es decir, atomos de carbono faltantes) cercanas al GeV. Esas vacantes pueden capturar o liberar localmente electrones de los atomos de carbono circundantes que forman el diamante, cambiando como consecuencia su propia carga.
Las fluctuaciones en el estado de carga de vacantes cercanas creadas aleatoriamente alteran el comportamiento del GeV de una manera perjudicial para muchas aplicaciones, siempre que no se controle (por ejemplo, para la generacion de entrelazamiento entre qubits de estado solido). Uno de los hitos que logro el equipo fue detectar, manipular e incluso inducir por primera vez estas variaciones de carga en las vacantes de carbono.?
Segun el Dr. Francesco Andreoli: i¿½Este efecto perjudicial ya se habia observado, pero ha

ta ahora no estaba clara su causa ni como tratarlo. En nuestro estudio ofrecemos na explicacion y un posible camino para controlar este problemai

GeVs frente a nanoantenas tradicionales: un enfoque complementario

Los investigadores destacan que las nanoantenas de GeV son muy diferentes a las nanoantenas tradicionales.

Por un lado, las nanoantenas estandar estan hechas de suficientes atomos como para que su respuesta optica este dictada por la de un material voluminoso, mientras que la estructura de un GeV se asemeja a la de un solo atomo. En consecuencia, una nanoantena de menos de (aproximadamente) diez nanometros experimenta una absorcion masiva, lo que hace que pierda drasticamente su eficiencia y no pueda amplificar el campo al maximo. Por el contrario, la eficiencia de un GeV como antena optica viene dada por su coherencia cuantica, que efectivamente esta desacoplada de su tamano fisico. Esto hace que el GeV sea perfectamente compatible con distancias nanometricas, lo que conlleva las grandes mejoras en la amplificacion de la senal electromagnetica reportadas en el estudio.

Por otro lado, este mismo mecanismo produce anchos de banda muy distintos en los que cada una de ellas puede operar. Las nanoantenas tradicionales son adecuadas para anchos de banda amplios, mientras que los GeV solo pueden funcionar en anchos de banda mas estrechos. Aunque para algunas aplicaciones es muy deseable un gran ancho de banda (ya que garantiza una capacidad de conduccion de banda ancha), el ancho de banda reducido de los GeV ofrece una notable sensibilidad a perturbaciones debiles que de otro modo pasarian desapercibidas.

Nuevas direcciones para las nanoantenas opticas

Dado que las mejoras de campo se utilizan a menudo en fotoquimica, una aplicacion directa de las nanoantenas de GeV podria ser mejorar la deteccion de moleculas mediante espectroscopia Raman u otras tecnicas basadas en luz. Los sensores opticos y las tecnologias cuanticas tambien podrian beneficiarse de ellas, por ejemplo para controlar la decoherencia en qubits de estado solido.

En resumen, este estudio abre caminos inexplorados para las nanoantenas opticas, cuyo regimen tipico de funcionamiento era muy diferente, tanto a un nivel tecnico como a un nivel mas conceptual y de largo plazo.

"El gran campo cercano generado a distancias cortas permite concentrar energia de manera masiva en un volumen notablemente pequeno, aumentando la eficiencia optica y permitiendo una alta precision espacial", enfatiza Andreoli sobre las nanoantenas reportadas. "Pero en un terreno mas amplio, esto solo muestra un ejemplo especifico de como nuestra novedosa perspectiva sobre los centros de color podria abrir nuevas direcciones para las nanoantenas opticas hacia regimenes aun inexplorados".

ICFO

Referencia bibliografica:

Li, Z., Guo, X., Jin, Y. et al. Atomic optical antennas in solids. Nat. Photon. (2024). https://doi.org/10.1038/s41566-024-01456-5