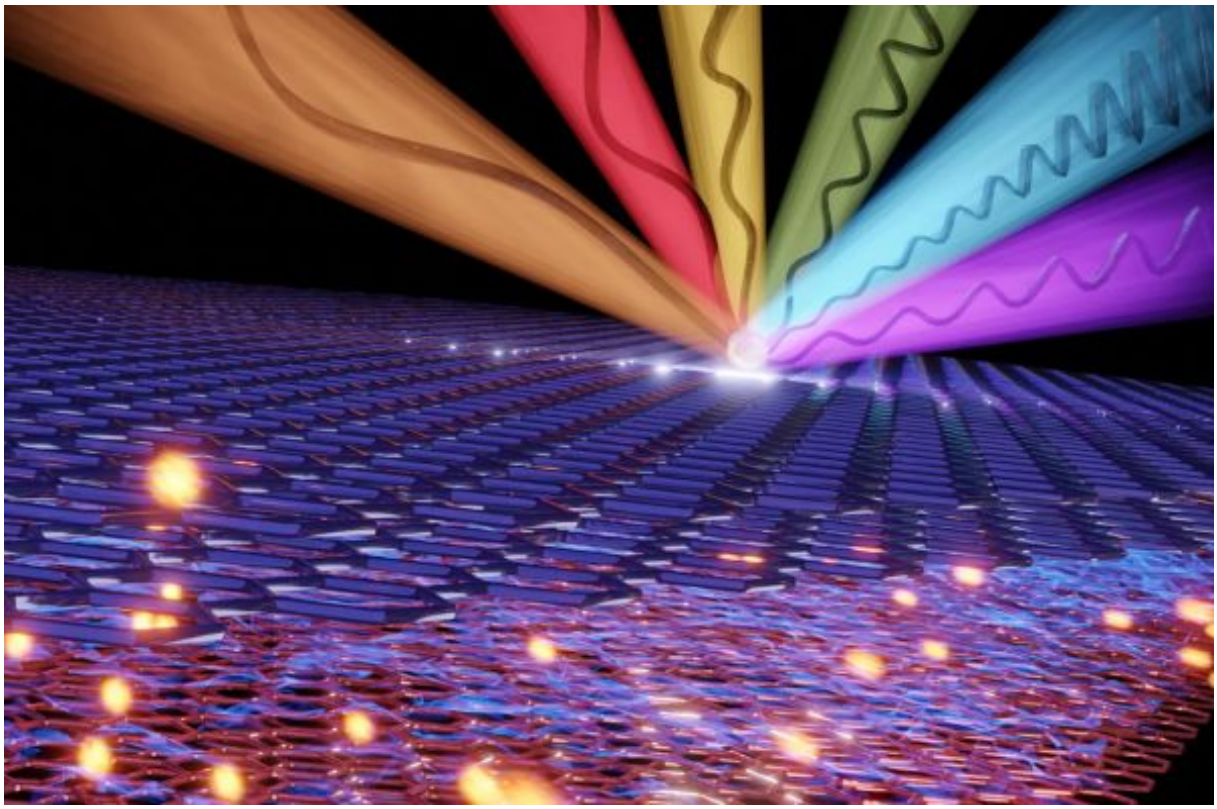
ICFO



Un equipo de investigadores demuestra una mejora radical en la fotodeteccion de banda ultraancha con un dispositivo basado en grafeno bicapa, doble, y trenzado

Un equipo internacional de investigadores publica en Nature Photonics el uso de grafeno bicapa doble y trenzado para desarrollar un detector eficiente capaz de generar imagenes continuas en un rango ultra amplio de espectro de luz.

September 26, 2023

Las imagenes hiperespectrales utilizan todo el espectro de luz para brindar informacion detallada sobre la naturaleza y su comportamiento. Estos conocimientos tienen multiples aplicaciones en ambitos diversos, desde la conduccion autonoma a la vigilancia medioambiental, la atencion sanitaria, la exploracion espacial o incluso la agricultura y el

procesamiento de alimentos.
La obtencion de imagenes desde el infrarrojo hasta el regimen de terahercios plantea un desafio tecnologico, ya que requiere de dispositivos suficientemente eficientes y sensibles en todo el rango del espectro. Hasta ahora, los unicos que cumplen parcialmente las expectativas son los conjuntos de fotoconductores basados en elementos de telururo de mercurio y cadmio. Aunque esta es la tecnologia mas adecuada que existe actualmente, su eficiencia de rendimiento en la deteccion de luz no es de banda ancha, puesto que tienden a ser absorbentes eficientes para ciertas longitudes de onda, pero funcionan peor para otras, y simplemente no tienen la capacidad de detectar las longitudes de onda de luz mas largasen el regimen de los terahercios, que se estan convirtiendo en cada vez mas relevantes para la tecnologia.
Tal y como comenta Frank Koppens, primer autor del estudio, i¿½La torsion de material s bidimensionales como el grafeno ha revolucionado el campo de los materiales cuantico , impulsado por el descubrimiento de la superconductividad no convencional. Pe o recientemente tambien hemos podido ver que es una plataforma para una amplia gama e aplicaciones, debido a sus propiedades unicas y altamente sintonizablesi¿ ?. En los ultimos anos se ha demostrado que el grafeno bicapa (BLG) es un fotodet ctor impresionante cuando esta polarizado con campos electricos externos, aunque, debido a su naturaleza 2D, la absorcion de luz es bastante limitada. Curiosamente, el BLG es compa ible con la tecnologia de silicio existente, imprescindible para su introduccion en el mercado Sin embargo, la necesidad de aplicar un campo electrico plantea enormes dificultades a la hora de ampliar la fabricacion en tres dimensiones, lo que seria necesario para super r el problema de la baja absorcion de

Un nuevo dispositivo

Los dispositivos de grafeno bicapa "doble" trenzado (TDBG), por otro lado, se han convertid en un material unico que puede evitar estas restricciones. El TDBG esta hecho de dos pil s de grafeno bicapa giradas o torcidas en un angulo grande (15 grados), que recientemente e ha demostrado que crean su propio campo electrico intrinseco sin la necesidad e electrodos adicionales que compliquen la fabricacion en el caso de BLG. Esto ha abier o perspectivas de deteccion de banda ancha en un sistema escalable. Pero, sin embargo, has a la fecha, todavia no se han probado las capacidades de deteccion de luz del TDB
Los investigadores del ICFO Hitesh Agarwal y **Krystian Nowakowski**, dirigidos por el investigador postdoctoral **Dr. Roshan Krishna Kumar** y el **profesor ICREA del ICFO Frank Koppens** juntamente con el grupo del **profesor ICREA Adrian Bachtold** en el ICFO, han trabajado en colaboracion con el **grupo de prof. Giacomo Scalari de ETH Zurich** e investigadores de la **Universidad de Manchester**, **NIMS** en Japon y **CNRS** en Francia, informan en un estudio publicado en Nature Photonics sobre el desarrollo de un novedoso fotodetector de banda ultraancha TDBG. Este detector es capaz de detectar luz de manera

muy eficiente, en un rango espectral que abarca desde el terahercio lejano (longitud de onda de 100 ?m, equivalente a 3 THz) hasta el infrarrojo cercano (longitud de onda de 2 ?m o 150 THz) y con una buena eficiencia continua en todo el rango, sin espacios. El fotodetector de banda ultraancha ha demostrado tener una buena **eficiencia cuantica interna**, una mejor fotoconductividad mediante el filtrado entre capas y la **escalabilidad** del TDBG, ya que no se necesitan puertas para aplicar el campo electrico y obtener la brecha energetica (bandgap). Los investigadores estudiaron exhaustivamente la fotorespuesta del TDBG. Fabricaron multiples dispositivos de TDBG y estudiaron su fotoconductividad, es decir, como cambia su resistencia electrica bajo la iluminacion. Como comenta el primer coautor del articulo Krystian Nowakowski, i¿½la idea de este experimento surgio despues de leer un estudio en l que los investigadores habian encontrado una pequena brecha energetica electronica en l grafeno doble bicapa y trenzado (TDBG), sin necesidad de aplicar un campo electri o externo, como suele ser el caso para abrir una brecha energetica en la pila comun de grafe o bicapa (BLG). La presencia de una brecha energetica hace que el grafeno bicapa sea un bu n detector de luz, pero la necesidad de aplicar un campo electrico externo es una barrera pa a las aplicaciones debido a la complejidad de ampliar la fabricacion para aplicacion s industrialesi¿½. Despues de examinar la literatura, vieron que nadie habia probado esto con el llamado BLG "doble" o T
BG. El equipo decidio centrar todos sus esfuerzos en preparar el experimento. Como recu rda Hitesh Agarwal, primer coautor, i¿½hacer muestras de TDBG no es una tarea tr vial. Comenzamos exfoliando escamas de grafeno y continuamos este proceso has a que pudimos encontrar una escama de grafeno bicapa lo suficientemente grande. Luego cortamos la hojuela por la mitad con un micro manipulador, cogimos una de las mitad s, la giramos 15 grados y la apilamos sobre la otra para crear una pila TDBGi¿½. Desp es, los dispositivos se enfriaron a una temperatura de 4 Kelvin para realizar mediciones pre isas de la resistencia electrica. Bajo la iluminacion con luz de infrarrojo medio, los invest gadores vieron que la resistencia disminuia significativamente, lo que genero la posibilidad de tilizar estos dispositivos como fotodet

Creatividad en la investigacion

Despues de varios meses de trabajar intensamente en el experimento y tras el cierre repentino en 2020, el equipo se vio obligado a buscar alternativas logisticas y experimentales para poder continuar con el estudio, incluyendo el control remoto de los equipos para continuar con las mediciones durante la pandemia. Con una actitud ingeniosa e inventiva, el equipo trabajo sin descanso para configurar el experimento, medir tanto como fuera posible y recopilar y comprender el tipo de datos que estaban obteniendo y lo que realmente significaban. "Uno de los grandes desafios al que nos enfrentamos fue comprender realmente el origen de la respuesta y compararla de manera fiable con tecnologias comerciales", recuerda Roshan Krishna Kumar.

Despues de muchos meses de analizar datos, determinar que habia que medir y por que, aprender a distinguir entre varias hipotesis y proponer nuevas ideas que pudieran facilitar la obtencion de resultados, finalmente lograron cuantificar la Eficiencia Cuantica Interna, el indicador de la fraccion de los fotones absorbidos que se convierten en el cambio medido en la corriente electrica. El equipo descubrio que la eficiencia de la mayor parte del rango del espectro era igual o superior al 40%, lo cual es un buen valor, siendo ademas muy prometedor al combinarlo con el alcance espectral ultra amplio y escalabilidad del TDBG.
Tras las mediciones iniciales, los investigadores se dieron cuenta de que el fotodetector podria tener capacidades de longitud de onda larga que se extendieran hasta 2 THz despues de caracterizar la brecha energetica intrinseca del TDBG, que establece la frecuencia de corte de sus detectores. Motivado por esta tentadora perspectiva, Hitesh Agarwal volo a Suiza para realizar las mediciones en el laboratorio de Giacomo Scalari, expertos en tecnologias de terahercios y colaboradores habituales de ICFO en el proyecto PhotoTBG. Alli, y gracias a que tenian configuraciones experimentales customizadas para medir en banda ancha, pudieron demostrar el rango de longitud de onda ultraancho.
Luego, los investigadores i¿½se centraron en comprender el mecanismo fisico detras de a senal medida. Despues de una larga lluvia de ideas con el prof. Frank Koppens, descubrim s que la respuesta se debe principalmente al efecto fotoconductor, donde los fotones influy n en la resistencia creando directamente mas pares huecos de electrones, en lugar del efec o bolometrico en el cual los fotones calientan la muestra influyendo indirectamente en a resistencia mediante el cambio de temperaturai?
½. Este estudio muestra que los metodos y resultados descritos pueden servir como gu a y punto de referencia para otros cientificos que utilizan la luz para estudiar estos interesa tes materiales retorcidos. La explicacion de la mejora de la conductividad mediante el cri ado entre capas, el metodo para diferenciar entre respuesta bolometrica y fotoconductora la idea propuesta de apilamiento tridimensional bien pueden usarse como base para fut ras investigaciones sobre otros materiales bidimensiona

Acknowledgements

We thank D. B. Ruiz, S. Castilla, D. De Fazio, M. Amir Ali, G. Li, A. Berdyugin, M. Polini, V. Mkhitaryan, G. Kumar, and I. Torre for technical discussions. We further thank M. Ceccanti for making the illustration presented in Fig. 1a. H.A., K.N. and R.B. acknowledge funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under Marie Sk?odowska-Curie grant agreement no. 665884, 713729 and 847517, respectively. S.B.-P. acknowledges funding from the Presidencia de la Agencia Estatal de Investigacion within the PRE2020-094404 predoctoral fellowship. G.S. and A.F. gratefully acknowledge funding from the ERC grant CHIC (no. 724344), and J. Faist for discussions. A.P. acknowledges support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under Marie Sklodowska-Curie grant agreement no. 873028 and from the Leverhulme Trust under grant

agreement RPG-2019-363. K.W. and T.T. acknowledge support from the Elemental Strategy Initiative conducted by MEXT Japan with grant no. JPMXP0112101001, JSPS KAKENHI (JP19H05790, JP20H00354 and JP21H05233) and CREST (JPMJCR15F3), JST. R.K.K. acknowledges the EU Horizon 2020 programme under MarieSk?odowska-Curie grants 754510 and 893030 and the FLAG-ERA grant (PhotoTBG, PCI2021-122020-2A), by ICFO, RWTH Aachen and ETHZ/Department of Physics. A.B. acknowledges support from ERC advanced grant no. 692876, MICINN grant no. RTI2018-097953-B-I00 and PID2021-122813OB-I00, AGAUR (grant no. 2017SGR1664), the Fondo Europeo de Desarrollo, the Spanish Ministry of Economy and Competitiveness through Quantum CCAA, EUR2022-134050, and CEX2019-000910-S [MCIN/AEI/10.13039/501100011033], MCIN with funding from European Union NextGenerationEU (PRTR-C17.I1)- Plan Complementario de Comunicaciones Cuanticas-, Fundacio Cellex, Fundacio Mir-Puig, Generalitat de Catalunya through CERCA. F.H.L.K. acknowledges support from the ERC TOPONANOP (726001), Fundacio Cellex, Fundacio Mir-Puig, Generalitat de Catalunya (CERCA, AGAUR, SGR 1656, program TWIST), the Government of Spain [PID2019-106875GB-I00; PCI2021-122020-2A; PDC2022-133844-I00 (Teracomm); Severo Ochoa CEX2019-000910-S] funded by MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and by the European Union NextGenerationEU/PRTR. Furthermore, the research leading to these results has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement no. 881603 (Graphene flagship Core3), 820378 (Quantum flagship) and 101034929 (Fastera). This material is based upon work supported by the Air Force Office of Scientific Research under award number FA8655-23-1-7047. Any opinions, findings, and conclusions or recommendations expressed in this material are those of the author(s) and do not necessarily reflect the views of the United States Air Force.

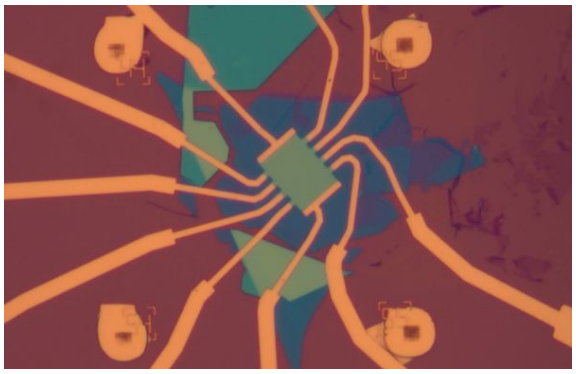


Imagen optica de una muestra de TDBG con forma de barra Hall para una medicion precisa de la resistividad electrica y la fotoconductividad.