

## Un equipo de investigadores demuestra una mejora radical en la fotodetección 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 imágenes continuas en un rango ultra amplio de espectro de luz.

September 26, 2023

Las imágenes hiperespectrales utilizan todo el espectro de luz para brindar información detallada sobre la naturaleza y su comportamiento. Estos conocimientos tienen múltiples aplicaciones en ámbitos diversos, desde la conducción autónoma a la vigilancia medioambiental, la atención sanitaria, la exploración espacial o incluso la agricultura y el

procesamiento de alimentos.

La obtención de imágenes desde el infrarrojo hasta el régimen de terahercios plantea un desafío tecnológico, ya que requiere de dispositivos suficientemente eficientes y sensibles en todo el rango del espectro. Hasta ahora, los únicos que cumplen parcialmente las expectativas son los conjuntos de fotoconductores basados en elementos de telururo de mercurio y cadmio. Aunque esta es la tecnología más adecuada que existe actualmente, su eficiencia de rendimiento en la detección 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 más largas en el régimen de los terahercios, que se están convirtiendo en cada vez más relevantes para la tecnología.

Tal y como comenta Frank Koppens, primer autor del estudio, *¿La torsión de materiales bidimensionales como el grafeno ha revolucionado el campo de los materiales cuánticos, impulsado por el descubrimiento de la superconductividad no convencional. Pero recientemente también hemos podido ver que es una plataforma para una amplia gama de aplicaciones, debido a sus propiedades únicas y altamente sintonizables?* En los últimos años se ha demostrado que el grafeno bicapa (BLG) es un fotodetector impresionante cuando está polarizado con campos eléctricos externos, aunque, debido a su naturaleza 2D, la absorción de luz es bastante limitada. Curiosamente, el BLG es compatible con la tecnología de silicio existente, imprescindible para su introducción en el mercado. Sin embargo, la necesidad de aplicar un campo eléctrico plantea enormes dificultades a la hora de ampliar la fabricación en tres dimensiones, lo que sería necesario para superar el problema de la baja absorción de

### **Un nuevo dispositivo**

Los dispositivos de grafeno bicapa "doble" trenzado (TDBG), por otro lado, se han convertido en un material único que puede evitar estas restricciones. El TDBG está hecho de dos pilas de grafeno bicapa giradas o torcidas en un ángulo grande (15 grados), que recientemente ha demostrado que crean su propio campo eléctrico intrínseco sin la necesidad de electrodos adicionales que compliquen la fabricación en el caso de BLG. Esto ha abierto perspectivas de detección de banda ancha en un sistema escalable. Pero, sin embargo, hasta la fecha, todavía no se han probado las capacidades de detección de luz del TDBG.

**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 colaboración con el grupo de prof. **Giacomo Scalari de ETH Zurich** e investigadores de la **Universidad de Manchester**, **NIMS** en Japón 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  $\mu\text{m}$ , equivalente a 3 THz) hasta el infrarrojo cercano (longitud de onda de 2  $\mu\text{m}$  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,  $\frac{1}{2}$  la idea de este experimento surgió despues de leer un estudio en el que los investigadores habian encontrado una pequena brecha energetica electronica en el grafeno doble bicapa y trenzado (TDBG), sin necesidad de aplicar un campo electrico externo, como suele ser el caso para abrir una brecha energetica en la pila comun de grafeno bicapa (BLG). La presencia de una brecha energetica hace que el grafeno bicapa sea un buen detector de luz, pero la necesidad de aplicar un campo electrico externo es una barrera para las aplicaciones debido a la complejidad de ampliar la fabricacion para aplicaciones industriales  $\frac{1}{2}$ . Despues de examinar la literatura, vieron que nadie habia probado esto con el llamado BLG "doble" o TDBG. El equipo decidio centrar todos sus esfuerzos en preparar el experimento. Como recuerda Hitesh Agarwal, primer coautor,  $\frac{1}{2}$  hacer muestras de TDBG no es una tarea trivial. Comenzamos exfoliando escamas de grafeno y continuamos este proceso hasta 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 mitades, la giramos 15 grados y la apilamos sobre la otra para crear una pila TDBG  $\frac{1}{2}$ . Despues, los dispositivos se enfriaron a una temperatura de 4 Kelvin para realizar mediciones precisas de la resistencia electrica. Bajo la iluminacion con luz de infrarrojo medio, los investigadores vieron que la resistencia disminuia significativamente, lo que genero la posibilidad de utilizar 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.

Después de muchos meses de analizar datos, determinar que había que medir y por qué, aprender a distinguir entre varias hipótesis y proponer nuevas ideas que pudieran facilitar la obtención de resultados, finalmente lograron cuantificar la Eficiencia Cuántica Interna, el indicador de la fracción de los fotones absorbidos que se convierten en el cambio medido en la corriente eléctrica. El equipo descubrió que la eficiencia de la mayor parte del rango del espectro era igual o superior al 40%, lo cual es un buen valor, siendo además 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 podría tener capacidades de longitud de onda larga que se extendieran hasta 2 THz después de caracterizar la brecha energética intrínseca del TDBG, que establece la frecuencia de corte de sus detectores. Motivado por esta tentadora perspectiva, Hitesh Agarwal viajó a Suiza para realizar las mediciones en el laboratorio de Giacomo Scalari, expertos en tecnologías de terahercios y colaboradores habituales de ICFO en el proyecto PhotoTDBG. Allí, y gracias a que tenían configuraciones experimentales customizadas para medir en banda ancha, pudieron demostrar el rango de longitud de onda ultraancho.

Luego, los investigadores se centraron en comprender el mecanismo físico detrás de la señal medida. Después de una larga lluvia de ideas con el prof. Frank Koppens, descubrimos que la respuesta se debe principalmente al efecto fotoconductor, donde los fotones influyen en la resistencia creando directamente más pares huecos de electrones, en lugar del efecto bolométrico en el cual los fotones calientan la muestra influyendo indirectamente en la resistencia mediante el cambio de temperatura?

Este estudio muestra que los métodos y resultados descritos pueden servir como guía y punto de referencia para otros científicos que utilizan la luz para estudiar estos interesantes materiales retorcidos. La explicación de la mejora de la conductividad mediante el crecimiento entre capas, el método para diferenciar entre respuesta bolométrica y fotoconductor, la idea propuesta de apilamiento tridimensional bien pueden usarse como base para futuras investigaciones sobre otros materiales bidimensionales.

### **Acknowledgements**

We thank D. B. Ruiz, S. Castilla, D. De Fazio, M. Amir Ali, G. Li, A. Berdyugin, M. Polini, V. Mkhitarian, 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 Skłodowska-Curie grant agreement no. 665884, 713729 and 847517, respectively. S.B.-P. acknowledges funding from the Presidencia de la Agencia Estatal de Investigación 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 Skłodowska-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 MarieSkłodowska-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 Cuánticas-, 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.

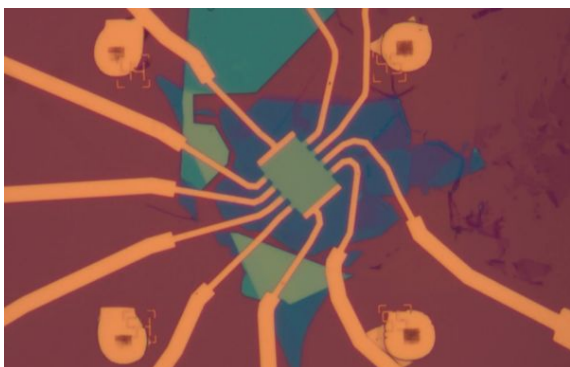


Imagen optica de una muestra de TDBG con forma de barra Hall para una medicion precisa de la resistividad electrica y la fotoconductividad.