

Un equip d'investigadors demostra una millora radical a la foto deteccio de banda ultraampla amb un dispositiu basat en grafe bicapa, doble, i trenat.

Un equip internacional d'investigadors publica a Nature Photonics l'us de grafe bicapa doble i trenat per desenvolupar un detector eficient capaç de generar imatges contínues en un rang ultra ampli d'espectre de llum.

September 26, 2023

Les imatges hiperespectrals fan servir tot l'espectre de llum per oferir informació detallada sobre la naturalesa i el comportament que tenen. Aquests coneixements tenen múltiples aplicacions en diferents àmbits, des de la conducció autònoma fins a la vigilància mediambiental, l'atenció sanitària, l'exploració espacial o l'agricultura i el processament d'aliments.

L'obtenció d'imatges des de l'infraroig fins al règim de terahercis planteja un desafiament tecnològic, ja que requereix dispositius prou eficients i sensibles a tot el rang de l'espectre.

Fins ara, els únics que compleixen parcialment les expectatives són els conjunts de fotoconductors basats en elements de tel·lurur de mercuri i cadmi. Tot i que aquesta és la tecnologia més adequada que existeix actualment, la seva eficiència de rendiment en la detecció de llum no és de banda ampla, ja que tendeixen a ser absorbents eficients per certes longituds d'ona, però funcionen pitjor per a altres, i simplement no tenen la capacitat de detectar les longituds d'ona de llum més llargues en el regim dels terahercis, que s'està convertint cada cop més rellevants per a la tecnologia

Com comenta Frank Koppens, primer autor de l'estudi, "La torsió de materials bidimensional com el grafe ha revolucionat el camp dels materials quàntics, impulsat pel descobriment de la superconductivitat no convencional. Però recentment també hem vist que és una plataforma per a una àmplia gamma d'aplicacions, per les propietats úniques i altament sintonitzables"

En els darrers anys s'ha demostrat que el grafe bicapa (BLG) és un fotodetector impressionant quan està polaritzat amb camps elèctrics externs, encara que a causa de la seva naturalesa 2D, l'absorció de llum és força limitada. Curiosament, el BLG és compatible amb la tecnologia de silici existent, imprescindible per a la seva introducció al mercat. Tot això, la necessitat d'aplicar un camp elèctric planteja enormes dificultats a l'hora d'ampliar la fabricació en tres dimensions, cosa que caldria per superar el problema de la baixa absorció de BLG

Un nou dispositiu

Els dispositius de grafe bicapa doble trenat (TDBG), per altra banda, han esdevingut un material únic que pot evitar aquestes restriccions. El TDBG està fet de dues piles de grafe bicapa girades o tortes en un angle gran (15 graus), que recentment s'ha demostrat que creen el seu propi camp elèctric intrínsec sense la necessitat d'electrodes addicionals que compliquin la fabricació en el cas de BLG. Això ha obert perspectives de detecció de banda ampla en un sistema escalable. Però fins ara encara no s'han provat les capacitats de detecció de llum del TDBG.

Els investigadors de l'ICFO Hitesh Agarwal i Krystian Nowakowski, dirigits per l'investigador postdoctoral Dr. Roshan Krishna Kumar i el Professor ICREA de l'ICFO Frank Koppens juntament amb el grup del Professor ICREA a l'ICFO Adrian Bachtold, han treballat en col·laboració amb el grup de Prof. Giacomo Scalari d'ETH Zurich i investigadors de la Universitat de Manchester, NIMS al Japó i CNRS a França, informen en un estudi publicat a Nature Photonics sobre el desenvolupament d'un nou fotodetector de banda ultraampla TDBG. Aquest detector és capaç de detectar llum de forma molt eficient, en un rang espectral que inclou des del teraherci llunya (longitud d'ona de 100 μm , equivalent a 3 THz) fins a l'infraroig proper (longitud d'ona de 2 μm o 150 THz) i amb una bona eficiència contínua a tot el rang, sense espais. El fotodetector de banda ultraampla ha demostrat tenir una bona **eficiència quàntica interna**, una millor fotoconductivitat mitjançant el filtratge entre capes i l'

escalabilitat del TDBG, ja que no calen portes per aplicar el camp elèctric i obtenir la bretxa energètica (bandgap).

Els investigadors van estudiar exhaustivament la fotoresposta del TDBG. Van fabricar múltiples dispositius de TDBG i van estudiar-ne la fotoconductivitat, es a dir, com canvia la seva resistència elèctrica sota la il·luminació. Com comenta el primer coautor de l'article Krystian Nowakowski, *«la idea d'aquest experiment va sorgir després de llegir un estudi on els investigadors havien trobat una petita bretxa energètica elèctrica al grafe doble bicapa i trenat (TDBG), sense necessitat d'aplicar un camp elèctric extern, com és el cas per obtenir una bretxa energètica a la pila comuna de grafe bicapa (BLG). La presència d'una bretxa energètica fa que el grafe bicapa sigui un bon detector de llum, però la necessitat d'aplicar un camp elèctric extern és una barrera per a les aplicacions a causa de la complexitat d'ampliar la fabricació per a aplicacions industrials»*. Després d'examinar la literatura van veure que ningú no havia provat això amb l'anomenat BLG "doble" o TDBG. L'equip va decidir centrar tots els esforços a preparar l'experiment. Com recorda Hitesh Agarwal, primer coautor, *"fer mostres de TDBG no és pas una tasca trivial. Vam començar exfoliant escates de grafe i vam continuar aquest procés fins que vam poder trobar una escata de grafe bicapa prou gran. Després tallem la fulla per la meitat amb un micromanipulador, agafem una de les meitats, la girem 15 graus i l'apilem sobre l'altra per crear una pila TDBG"*. Posteriorment, els dispositius es van refredar a una temperatura de 4 Kelvin per realitzar mesuraments precisos de la resistència elèctrica. Sota la il·luminació amb llum d'infraroig mitjà, els investigadors van veure que la resistència disminuïa significativament, cosa que va generar la possibilitat d'utilitzar aquests dispositius com a fotodetectors.

Creativitat a la investigació

Després de diversos mesos de treballar intensament a l'experiment i després del tancament sobtat el 2020, l'equip es va veure obligat a buscar alternatives logístiques i experimentals per poder continuar amb l'estudi, incloent-hi el control remot dels equips per continuar amb els mesuraments durant la pandèmia. Amb una actitud enginyosa i inventiva, l'equip va treballar sense parar per configurar l'experiment, mesurar tant com fos possible i recopilar i comprendre el tipus de dades que estaven obtenint i allò que realment significaven. *"Un dels grans desafiaments a que ens enfrontem va ser comprendre realment l'origen de la resposta i comparar-la de manera fiable amb tecnologies comercials"*, recorda Roshan Krishna Kumar. Després de moltes mesos de analitzar dades, determinar què havia de mesurar i per què, aprendre a distingir entre diverses hipòtesis i proposar noves idees que poguessin facilitar la obtenció de resultats, finalment van aconseguir quantificar la Eficiència Quàntica Interna - indicador de la fracció de fotons absorbits que es converteixen en el canvi mesurat en la corrent elèctrica, i va descobrir que la eficiència de la major part del rang del espectre era igual o superior al 40%, el qual és un bon valor i molt prometedor quan es combina

con el espectro espectral ultra amplio. alcance y escalabilidad de TDBG.

Despres d'analitzar les dades, determinar que calia mesurar i per que aprendre a distingir entre diverses hipotesis i proposar noves idees que poguessin facilitar l'obtencio de resultats, finalment van aconseguir quantificar l'Eficiencia Quantica Interna, l'indicador de la fraccio dels fotons absorbits que es converteixen en el canvi mesurat al corrent electric. L'equip va descobrir que l'eficiencia de la major part del rang de l'espectre era igual o superior al 40%, la qual cosa es un bon valor, i es molt prometedor en combinar-lo amb l'abast espectral ultra ampli i escalabilitat del TDBG..

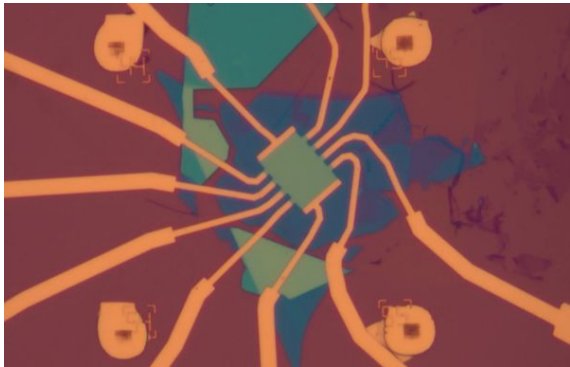
Els investigadors posteriorment "van centrar-nos a comprendre el mecanisme fisic darrere del senyal mesurat. Despres d'una llarga pluja d'idees amb el Prof. Frank Koppens, vam descobrir que la resposta es deu principalment a l'efecte fotoconductor, on els fotons influeixen en la resistencia creant directament mes parells buits d'electrons, en lloc de l'efecte bolometric en que els fotons escalfen la mostra influint indirectament en la resistencia mitjancant el canvi de temperatura".

Aquest estudi mostra que els metodes i resultats descrits poden servir com a guia i punt de referencia per a altres científics que utilitzen la llum per estudiar aquests interessants materials recaragolats. L'explicacio de la millora de la conductivitat mitjancant el cribratge entre capes, el metode per diferenciar entre resposta bolometrica i fotoconductor a i la idea proposada d'apilament tridimensional es poden fer servir com a base per a futures investigacions sobre altres materials bidimensionals.

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 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 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 Marie Skłodowska-Curie grants 754510 and 893030 and the FLAG-ERA grant (PhotoTDBG, 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 d 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 b MCIN/AEI/10.13039/501100011033 and by the European Union NextGenerationEU/PRTR Furthermore, the research leading to these results has received funding from the Europea 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 Researc under award number FA8655-23-1-7047. Any opinions, findings, and conclusions o recommendations expressed in this material are those of the author(s) and do not necessariil reflect the views of the United States Air Force



Imatge optica d'una mostra de TDBG amb forma de barra Hall per a un mesurament precis de la resistivitat electrica i la fotoconductivitat.