

Proyecto 20FUN03 COMET. Nuevos materiales para la Resistencia Hall Cuántica

F. Raso¹, G. Luka², A. Cultrera³, F. Couëdo⁴, H. Scherer⁵, A.E. Sadak⁶, T. Heine⁷, E. Cánovas⁸, M. Ortolano⁹, R. Dong¹⁰

⁽¹⁾ Centro Español de Metrología (CEM). C. Alfar, nº 2. 28760-Tres Cantos.

⁽²⁾ Główny Urząd Miar (GUM), Varsovia, Polonia

⁽³⁾ Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), Turín, Italia

⁽⁴⁾ Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), Trappes, Francia

⁽⁵⁾ Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, Alemania

⁽⁶⁾ Türkiye Bilimsel Ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), Gebze, Turquía

⁽⁷⁾ Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf (HZDR), Dresden, Alemania

⁽⁸⁾ IMDEA-Nanociencia. C. Faraday, nº 9. 28049-Cantoblanco. Madrid

⁽⁹⁾ Politecnico di Torino (POLITO), Turín, Italia

⁽¹⁰⁾ Technische Universität Dresden (TUD), Dresden, Alemania

⁽¹⁾ F. Raso. Tfno. 918074826. e-mail: fraso@cem.es.

RESUMEN: En esta ponencia se presenta el proyecto EMPIR 20FUN03 COMET que está enfocado a la investigación y desarrollo de nuevos materiales bidimensionales que puedan suponer una alternativa a los actuales patrones de resistencia basados en el efecto Hall cuántico.

1. INTRODUCCIÓN

Desde el descubrimiento del efecto Hall Cuántico (QHE) en 1980 [1], ha sido empleado como patrón de resistencia. Tras la redefinición de varias unidades básicas del Sistema Internacional de Unidades (SI) en 2018 [2], ha llegado a ser una forma directa de realización de la unidad SI de resistencia, el ohmio y, combinado con el patrón de tensión basado en el efecto Josephson, uno de los métodos recomendados de realización de la unidad eléctrica básica en el SI, el amperio [3].

$$R_K = \frac{h}{e^2} = 25812.8074593045\Omega \quad (1)$$

Sin embargo, la difusión de los patrones de resistencia basados en QHE ha sido muy limitada hasta el momento, debido a las muy exigentes condiciones experimentales necesarias para su realización en las muestras hasta ahora utilizadas, heteroestructuras GaAs/AlGaAs, típicamente a temperaturas inferiores a 1,5 K y campos magnéticos de más de 10 T [4]. Se ha realizado un intenso esfuerzo de investigación sobre las posibilidades del grafeno como nuevo material base para los patrones de resistencia y, si bien se ha demostrado que es posible realizar el QHE en este material en condiciones experimentales mucho menos exigentes (5 K y 5 T) [5] y con gran exactitud, aún hay problemas que dificultan su estabilidad y su fabricación masiva y predecible.

Ante esta situación, un consorcio formado por diez participantes, que incluyen institutos nacionales de metrología, institutos de investigación y universidades ha iniciado un proyecto

conjunto de investigación sobre una nueva categoría de materiales bidimensionales, las matrices covalentes-orgánicas y metal-orgánicas. Estos nuevos materiales tienen el potencial de tener un diagrama de niveles de energía formado por conos de Dirac, al igual que el grafeno, por lo que deberían mostrar el QHE.

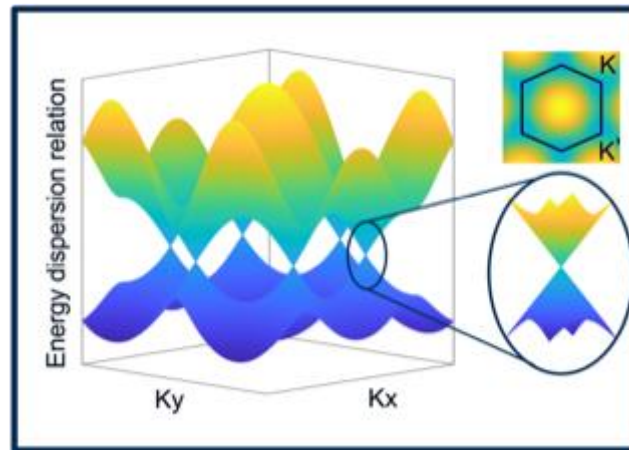


Fig 1. Estructura de bandas tipo conos de Dirac.

Además, a diferencia del grafeno, las propiedades de estos materiales son altamente sintonizables y pueden ser ajustadas variando ciertos parámetros durante el proceso de fabricación y se considera que podrían ser mucho más estables. El proyecto se compone de tres paquetes de trabajo técnicos, dedicados, respectivamente, a la fabricación de muestras, su caracterización y su uso en Metrología.

2. DESARROLLO/DESCRIPCIÓN

Objetivos del proyecto

El proyecto tiene los siguientes objetivos:

1 - Desarrollar matrices de Dirac covalentes-orgánicas y metal-orgánicas bidimensionales monocapa (2D-COF/MOFs), en las cuales estructuras hexagonales similares a las del grafeno se obtengan a partir de ligantes orgánicos trigonales. La química, la morfología y las propiedades electrónicas de las 2D-COF/MOFs serán sintonizadas de manera precisa y escalable.

2 - Realizar la caracterización trazable multi-escala de las muestras 2D-COF/MOFs. Específicamente, para caracterizar sus propiedades eléctricas como función del área de la muestra y la naturaleza del sustrato empleado (antes y después de su integración en dispositivos QHRS).

3 - Realizar medidas de Efecto Hall Cuántico y asegurar el potencial de los materiales 2D-COF/MOFs para realizar un Patrón de Resistencia Hall Cuántica (QHRS). Específicamente, comparar los dispositivos QHRS basados en estas muestras contra los basados en grafeno y en heteroestructuras AlGaAs/GaAs.

4- Asegurar el liderazgo europeo en la investigación de un una clase novedosa de materiales 2D, mediante el establecimiento de capacidades de investigación, protocolos adecuados, esquemas de calidad y trazabilidad; y facilitar el acceso de la tecnología y de la infraestructura de medida desarrolladas por el proyecto por parte de la comunidad metrológica y en el desarrollo de tecnología emergentes tales como la conversión de energía solar, sensores, membranas, optoelectrónica, espintrónica, etcétera. **Diseminar los resultados a los interesados** (dentro y fuera de la comunidad metrológica) con el fin de habilitar una cooperación en investigación que pueda ser sostenida a largo plazo.

Consortio:

El consorcio que lleva a cabo este proyecto está formado por 6 Institutos Nacionales de Metrología (INM's), como socios internos, y 4 universidades o centros de investigación especializados en Nanotecnología, como socios externos.

Los INM's son los siguientes:

- Centro Español de Metrología (CEM), España, coordinador del proyecto.
- Główny Urząd Miar (GUM), Polonia.
- Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), Italia.
- Laboratoire national de métrologie et d'essais, (LNE), Francia
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Alemania.
- Türkiye Bilimsel Ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), Turquía.

Los socios externos son los siguientes:

- Helmholtz Zentrum Dresden Rossendorf (HZDR), Alemania.
- Instituto Madrileño de Estudios Avanzados en Nanociencia (IMDEA), España.
- POLITO, Italia.
- TUD, Alemania.

A continuación, se muestran los logotipos de todos los participantes del proyecto:



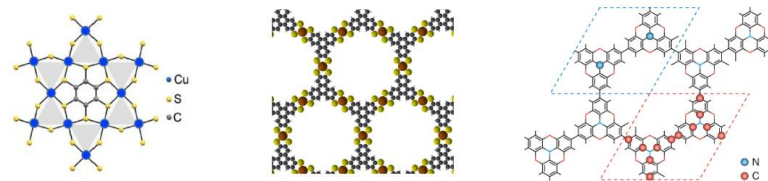
Fig. 2: Logotipos de todos los socios del proyecto y del propio proyecto.

Es un consorcio muy equilibrado entre socios internos y externos y que incluye a todos los mayores institutos de metrología europeos excepto el NPL británico y, por parte de los socios externos, una amplia experiencia y capacidad técnica en el campo de la Nanotecnología. Es de destacar la importante participación española, con dos de los diez socios, incluyendo al coordinador del proyecto.

Plan de trabajo:

El proyecto está dividido en tres paquetes de trabajo, más dos paquetes relacionados con Impacto, así como gestión y coordinación).

El primer paquete de trabajo WP1 “*Synthesis and engineering of 2D-MOF/COFs*” está dedicado a la síntesis de muestras de materiales bidimensionales con estructuras de bandas tipo conos de Dirac, y al ajuste y optimización de sus propiedades físicas y químicas para su posterior uso como patrones de resistencia basado en el valor de la resistencia Hall cuántica. Se han identificado de manera teórica tres tipos de materiales bidimensionales que tienen la estructura cristalina y una estructura de bandas energéticas eventualmente definida por conos de Dirac; de manera que los convierten en posibles candidatos a patrones de resistencia.



Sample 1: BHT-Cu

Sample 2: HTTP-Pt

Sample 3: P²-TANG

Fig. 3: Tres tipos de muestras bidimensionales hexagonales con estructura de bandas de energía tipo conos de Dirac .

El segundo paquete de trabajo técnico, WP2 “*Electrical characterization*”, incluye el desarrollo de dispositivos eléctricos, añadiendo electrodos y contactos y encapsulando las muestras. También se realizarán tareas relacionadas con el desarrollo de distintos instrumentos de medida para la caracterización de las muestras, sobre todo tomógrafos de resistividad eléctrica y espectrómetros de ruido eléctrico. Por supuesto, también incluye la caracterización eléctrica de las muestras propiamente dicha, usando la nueva instrumentación desarrollada.

El tercer paquete de trabajo WP3 “*Quantum resistance metrology*”, incluye el estudio del efecto Hall cuántico (transporte cuántico y ruido eléctrico) en las muestras desarrolladas en el WP1, la adaptación a este nuevo tipo de muestras de la instrumentación metrológica ya existente en los INM's y la comparación de este nuevo tipo de patrones con los patrones previamente existentes basados en heteroestructuras de AlGaAs.

La relación funcional entre los tres paquetes técnicos se muestra en el siguiente gráfico:

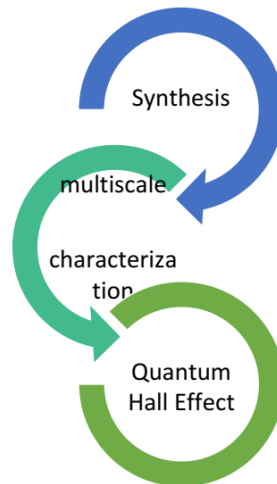


Fig. 4: Relación entre los tres paquetes técnicos del proyecto.

Además, y como en todos los proyectos europeos, hay otros dos paquetes de trabajo genéricos, uno dedicado a la creación de impacto y otro a la gestión del propio proyecto.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proyecto está en una fase muy temprana, por lo que aún se tienen resultados preliminares. Se ha desarrollado en TUD un primer lote de muestras de BHT-Cu, que han sido procesadas en la sala blanca de IMDEA para obtener dispositivos funcionales.

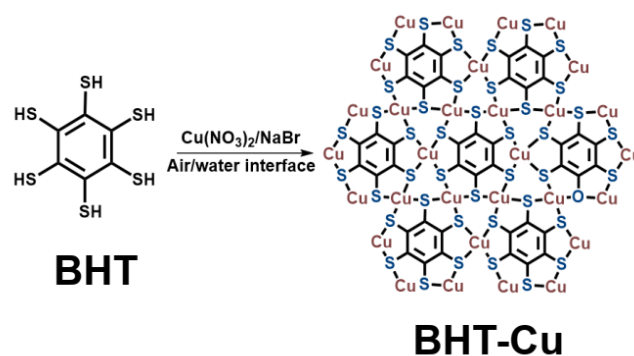


Fig. 5: Síntesis de BHT-Cu a partir de precursores de BHT y cobre.

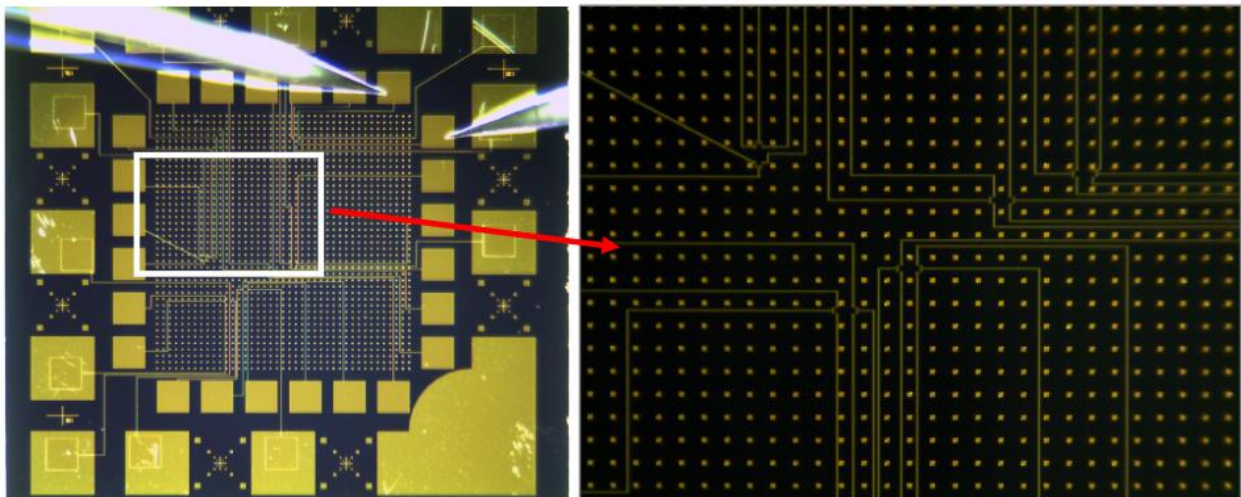


Fig. 6: Fabricación de dispositivos a partir de muestras de BHT-Cu.

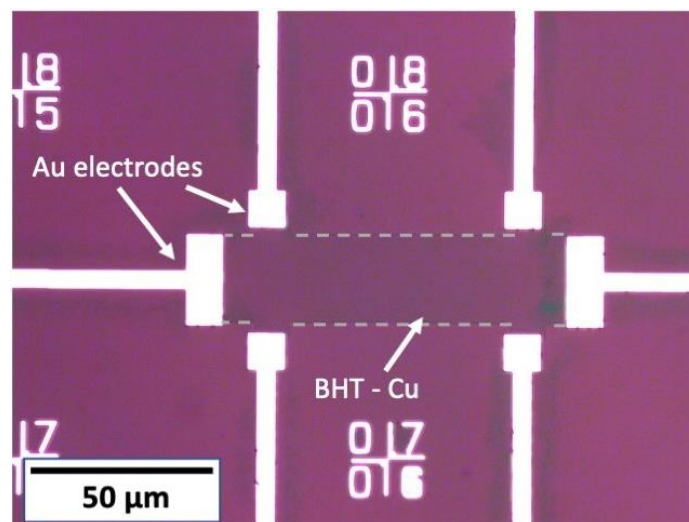


Fig. 7: Vista cercana de dispositivo de BHT-Cu.

Desafortunadamente, este primer material estudiado ha resultado ser aislante, lo que le hace inadecuado para su uso como patrón de resistencia basado en el efecto Hall cuántico, que es el objetivo del proyecto. Sin embargo, es un resultado interesante en sí mismo, ya que apenas existen materiales bidimensionales que sean aislantes.

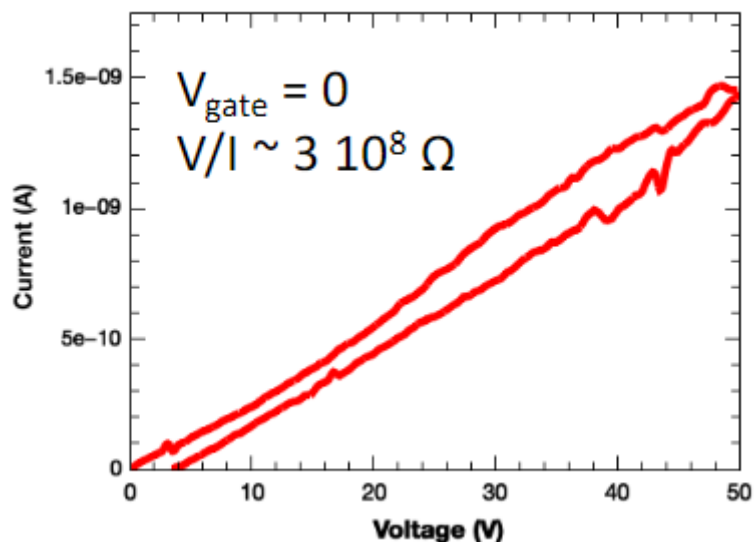


Fig. 8: Curva I-V de un dispositivo de BHT-Cu.

La síntesis de una segunda muestra basada en triángulos y denominada P²TANG ya ha sido iniciada a partir de la síntesis del monómero precursor TBTANG.

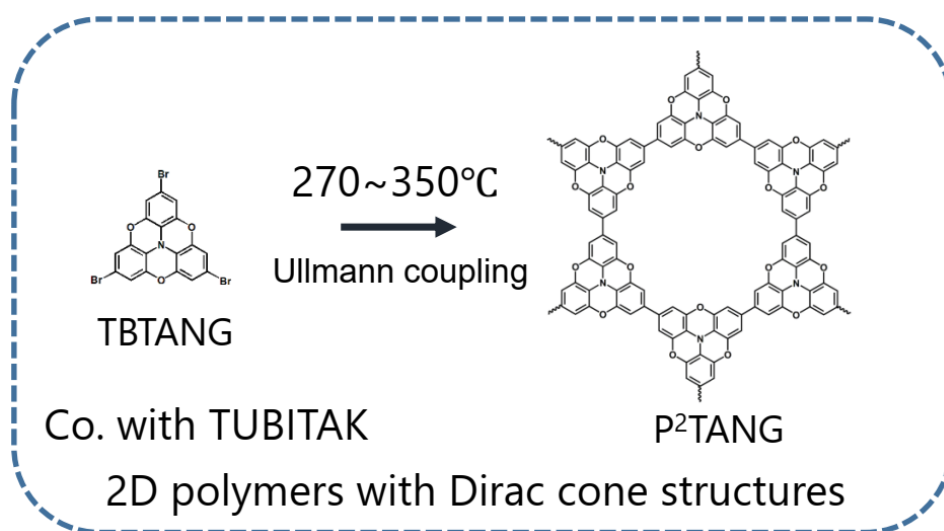


Fig. 8: Síntesis de P²TANG a partir de TBTANG.

En cuanto al Impacto, el proyecto ha sido presentado o mencionado hasta ahora en muchas charlas y pósters en distintas conferencias y reuniones. Además, se ha creado una página web del proyecto, con la dirección comet.imdea.eu.

4. CONCLUSIONES

Este proyecto es de gran importancia metrológica, ya que podría permitir la difusión de los patrones cuánticos de resistencia más allá del campo de los institutos de metrología. Facilitaría también la realización de las principales unidades eléctricas del SI de acuerdo con su actual definición aprobada en la Conferencia General de Pesas y Medidas de 2018. Estos nuevos materiales bidimensionales pueden tener

El proyecto COMET es el primer proyecto de Investigación Fundamental coordinado por España dentro del programa EMPIR, y es, en gran medida, resultado de la colaboración entre el CEM e IMDEA Nanociencia. Este éxito anima a ambas instituciones a continuar con su colaboración y puede servir de ejemplo de lo que se puede lograr cuando instituciones metrológicas y de otros campos científicos unen sus esfuerzos en busca de objetivos comunes.

5. REFERENCIAS

- [1] K. von Klitzing, G. Dorda, M. Pepper. *Phys. Rev. Lett.* 45 (6): 494–497. (1980).
- [2] Resolution 1 of the 26th CGPM (2018). Sevres, 2018. *On the revision of the International System of Units (SI)*. Disponible en <https://www.bipm.org/>
- [3] BIPM, The International System of Units (SI Brochure) [9th edition, 2019] – Appendix 2. *Mise en pratique for the definition of the ampere and other electric units in the SI*. Sevres, 2019. Disponible en <https://www.bipm.org/>
- [4] B. Jeckelmann and B. Jeanneret. *Rep. Prog. Phys.* 64 (2001) 1603–1655 PII: S0034-4885(01)39878-0.
- [5] R. Ribeiro-Palau, F. Lafont, J. Brun-Picard, D. Kazazis, A. Michon, F. Cheynis, O. Couturaud, C. Consejo, B. Jouault, W. Poirier and F. Schopfer. *Graphene surpasses GaAs/AlGaAs for the application of the quantum Hall effect in metrology*. 33 (2015). <http://arxiv.org/abs/1504.06511>

6. AGRADECIMIENTOS

El proyecto EMPIR 20FUN03 COMET *Two dimensional lattices of covalent- and metal-organic frameworks for the Quantum Hall resistance standard* está financiado por el programa *European Metrology Programme for Innovation and Research* (EMPIR), cofinanciado por los estados participantes y el programa de investigación e innovación de la Unión Europea, Horizonte 2020.