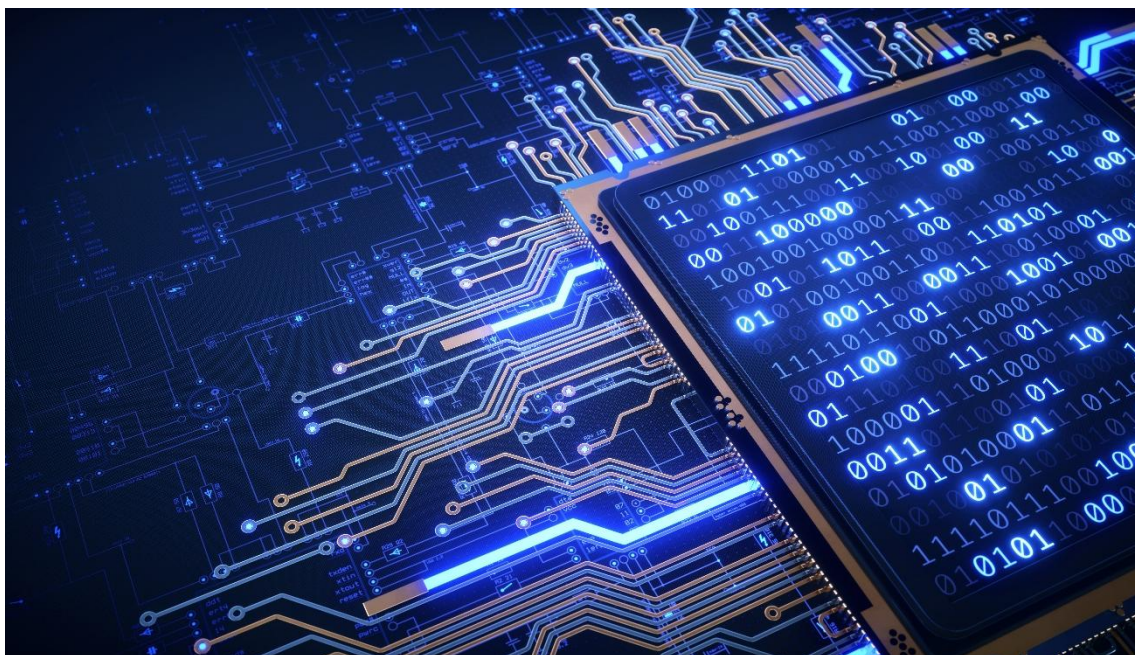


Madrid, lunes, 14 de septiembre de 2026

Espintrónica: los diminutos imanes electrónicos que propulsarán la tecnología futura

- Diversos equipos del CSIC exploran las singulares propiedades magnéticas de los electrones, que permiten controlar las características de los materiales
- Estas propiedades permiten lograr dispositivos, como memorias, circuitos y sensores, con más capacidad, más pequeños, rápidos y eficientes



La espintrónica explora nuevas formas de almacenar y procesar información aprovechando las propiedades magnéticas de los electrones

La espintrónica es una rama de la física cuántica que estudia una característica de los electrones: su espín, una especie de movimiento rotatorio que les hace comportarse como pequeños imanes. Precisamente estas propiedades magnéticas de los electrones permiten que sean manipulables, lo que ofrece a los científicos una vía para modificar las características de los materiales y darles múltiples funciones. Se trata de una

alternativa a la electrónica convencional que busca aprovechar tanto el espín del electrón como la propia carga de la partícula.

En el CSIC, diversos equipos investigan las fronteras de la espintrónica e indagan en sus aplicaciones para lograr nuevos materiales que puedan resolver diversos desafíos como la mejora de la miniaturización, la rapidez y la eficiencia energética de la tecnología.

En el Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón (INMA, centro mixto CSIC-Universidad de Zaragoza), el grupo Nanomidas, liderado por el investigador **José María de Teresa**, está especializado en la nanofabricación avanzada, y con este objetivo investigan para construir dispositivos a escala nanométrica mediante haces focalizados de electrones e iones, una herramienta que permite diseñar materiales y estructuras con una precisión extraordinaria. Y uno de sus principales campos de investigación es la espintrónica.

“La espintrónica intenta conseguir una electrónica de bajo consumo utilizando el espín del electrón en lugar de su carga”, concreta De Teresa. “Este cambio de enfoque es muy importante actualmente, porque el consumo energético de la tecnología digital está creciendo de forma acelerada, impulsado por los centros de datos y la inteligencia artificial, lo que hace urgente encontrar soluciones más eficientes desde el punto de vista energético”, explica.

Para ello, el grupo Nanomidas del INMA fabrica dispositivos capaces de generar corrientes de espín, que posteriormente pueden transformarse en corrientes de carga, compatibles con la electrónica actual. La corriente de carga es el flujo de electrones que circula por un conductor para alimentar un dispositivo conectado a un circuito. Esta capacidad de conversión es clave para integrar nuevas tecnologías en los sistemas existentes.

Estos dispositivos tienen, además, una ventaja fundamental: la información puede mantenerse sin necesidad de un aporte continuo de energía. “Al estar basados en materiales magnéticos, la información permanece y no es necesario estar alimentándola constantemente”, señala José María de Teresa.

“Además, hoy en día la computación y la memoria están separadas, pero con espintrónica se podrían obtener ambas cosas en el mismo dispositivo”, explica el investigador. Este enfoque recuerda al funcionamiento del cerebro, donde las redes neuronales almacenan y procesan información de forma simultánea, y abre la puerta a sistemas neuromórficos, que al procesar la información en paralelo ofrecen una alternativa a la lógica binaria de la computación tradicional.

Nanofabricación de superconductores

El grupo Nanomidas explora otra línea igualmente prometedora: la nanofabricación de dispositivos superconductores. Utilizando haces de iones focalizados, los investigadores introducen un gas precursor que se descompone para formar materiales superconductores con una resolución de apenas unos nanómetros. “Podemos concentrar un haz de iones de galio hasta unos cinco nanómetros y un haz de iones de

helio por debajo de un nanómetro, y crear, por ejemplo, nanohilos superconductores con gran control”, explica De Teresa.

Estas estructuras permiten estudiar y desarrollar nuevos dispositivos en los que la resistencia eléctrica desaparece, lo que implica una transmisión de energía sin pérdidas. Pero el verdadero potencial surge al combinar estos superconductores con materiales cuánticos topológicos, una clase de materiales con propiedades electrónicas singulares. En ellos, el interior actúa como aislante, mientras que la superficie conduce la electricidad de forma muy eficiente.

El objetivo del grupo es inducir superconductividad en estos materiales topológicos, lo que podría dar lugar a fenómenos cuánticos de gran interés y alineados con las nuevas necesidades de la sociedad. “Estamos intentando inducir superconductividad en aislantes topológicos para que aparezcan fermiones de Majorana”, señala De Teresa. Estas cuasipartículas, aún en estudio, son especialmente relevantes porque podrían utilizarse como base para sistemas de computación cuántica más robustos.

Así, la investigación en el INMA se sitúa en la encrucijada entre nanofabricación, espintrónica y tecnologías cuánticas. A través del control preciso de los materiales a escala nanométrica, el grupo no sólo explora nuevos fenómenos físicos fundamentales, sino que también sienta las bases de dispositivos electrónicos más eficientes, capaces y adaptados a los retos tecnológicos del futuro.

Magnetismo a escala atómica

También con el objetivo de reducir el consumo energético las nuevas tecnologías, el equipo del investigador **Can Onur Avci**, del Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (ICMAB-CSIC), explora una línea de investigación en física aplicada centrada en la espintrónica, los materiales magnéticos y los fenómenos cuánticos impulsados por el acoplamiento espín-órbita en heteroestructuras 3D de películas finas. Las heteroestructuras consisten en la unión en capas de dos o más materiales semiconductores, cada uno con propiedades electrónicas distintas. Al unir estos materiales a escala nanométrica, se establecen entre ellos relaciones singulares (interfaces) que dan lugar a propiedades eléctricas y ópticas muy útiles, que no se logran en cada material de forma independiente. Estas heteroestructuras son fundamentales para los transistores de alta velocidad en computación, en células fotovoltaicas de alta eficiencia, y en láseres y dispositivos optoelectrónicos..

“Nuestra investigación busca entender y controlar cómo se mueven los electrones en materiales magnéticos muy pequeños —tan pequeños que solo tienen unos pocos átomos de grosor— e interactúan con el magnetismo en escalas atómicas”, explica Avci. “Los electrones tienen una propiedad llamada espín, que se comporta como una pequeña brújula magnética”, añade. Su grupo explora cómo utilizar este espín para almacenar, procesar o transportar información de una manera mucho más eficiente que en la electrónica actual.

De hecho, la espintrónica contribuyó de forma decisiva al desarrollo tecnológico con el descubrimiento de la magnetorresistencia gigante, galardonado con el Premio Nobel de

Física en 2007, que dio lugar a sensores magnéticos diminutos y extremadamente sensibles, esenciales en la expansión del almacenamiento digital de las décadas de 1990 y 2000.

Hoy en día, la espintrónica persigue diseñar tecnologías informáticas más económicas y energéticamente eficientes, un reto en el que el grupo de Avci también desempeña un papel activo.

La física cuántica es central en la espintrónica, porque el espín es en sí mismo una propiedad cuántica de los electrones. Muchos de los efectos que estudian —como el acoplamiento espín-órbita, los estados de pozo cuántico en multicapa o las interacciones magnéticas quirales— surgen directamente de la mecánica cuántica.

Un aspecto especialmente importante es cómo los efectos cuánticos en las interfaces entre diferentes materiales dan lugar a nuevas formas de convertir corrientes de carga en corrientes de espín. Estos fenómenos cuánticos interfaciales permiten controlar el magnetismo con señales extremadamente pequeñas, abriendo la puerta a tecnologías de bajo consumo energético.

Aislantes magnéticos

Otro ingrediente cuántico clave es el comportamiento de los aislantes magnéticos, donde la información puede ser transportada por excitaciones cuánticas colectivas (magnones) en lugar de corrientes eléctricas, lo que reduce aún más las pérdidas de energía.

“Nuestro equipo diseña y estudia materiales magnéticos ultrafinos en los que las corrientes eléctricas pueden conmutar y detectar la magnetización, generar nuevos estados magnéticos o transmitir información sin mover ninguna carga eléctrica”, explica Can Onur Avci. Estos fenómenos son la base de la espintrónica, un campo que tiene como objetivo crear dispositivos más rápidos, más pequeños y mucho más eficientes energéticamente para la computación y el almacenamiento de datos.

La espintrónica ofrece un camino hacia tecnologías que consumen mucha menos energía —una necesidad cada vez más urgente a medida que el uso global de datos sigue creciendo—. Memorias, circuitos lógicos y sensores más eficientes podrían reducir de manera drástica la huella energética de la computación y de los centros de datos.

La investigación sobre aislantes magnéticos, interacciones quirales y aprovechamiento energético basado en el espín también puede contribuir a nuevos conceptos de dispositivos para la computación ultrarrápida o para convertir el calor residual en electricidad utilizable. Reducir drásticamente la huella tecnológica significaría un mundo más limpio y sostenible.

Tecnologías a medio plazo

Algunas aplicaciones, como sensores magnéticos mejorados o elementos de memoria de bajo consumo, podrían aparecer en un plazo de 5 a 10 años. Otras —como las tecnologías de computación no convencional basadas en el espín (como la computación

neuromórfica o la computación probabilística), que podrían complementar o ir más allá de la electrónica tradicional— requerirán un desarrollo a más largo plazo.

Sin embargo, los avances fundamentales que se persiguen ahora establecen las bases de las tecnologías electrónicas sostenibles del futuro. Estos desarrollos son especialmente relevantes en la era actual y futura de la inteligencia artificial, en la que los datos se vuelven cada vez más importantes.

El trabajo realizado en el ICMAB combina descubrimiento de materiales, fabricación de dispositivos y medidas avanzadas. Cultivan películas magnéticas ultrafinas —a menudo de solo unos pocos nanómetros de grosor— mediante técnicas especializadas, y luego las convierten en micro- y nanodispositivos en instalaciones de sala blanca. Después, estudian sus propiedades mediante métodos eléctricos, magnéticos y magnetoópticos, a menudo a escalas extremadamente pequeñas.

En resumen, la espintrónica es una rama de la ciencia cuántica con un futuro muy prometedor para lograr un mundo con menor huella tecnológica y, por tanto, más sostenible.

“Avanzar hacia este futuro sostenible requerirá un enfoque inter- y multidisciplinario que combine conocimientos de distintas áreas científicas y tecnológicas. Del mismo modo, será fundamental contar con inversiones públicas y privadas que apoyen tanto la creación de nuevos materiales y dispositivos como la formación de la masa crítica de investigadores y profesionales que harán realidad estas soluciones”, según Avci.

Espintrónica y materiales bidimensionales

Cuando hablamos de los materiales con mayor potencial en el campo de la espintrónica, es imprescindible mencionar los llamados materiales bidimensionales, o 2D. Se trata de sistemas ultrafinos, formados por una sola capa de átomos o por unas pocas capas apiladas. Desde el descubrimiento del grafeno, considerado el primer material 2D aislado, la investigación en este ámbito ha crecido mucho, especialmente en el campo de la nanoelectrónica.

En estos materiales, sus electrones se mueven en un único plano. Esto da lugar a fenómenos físicos y propiedades que no observamos en los materiales tradicionales. Además, la posibilidad de combinar distintos materiales 2D entre sí en estructuras más complejas permite realizar una auténtica ingeniería de materiales. En ellas, un material puede adquirir propiedades nuevas gracias a la influencia de otro. Esta capacidad es especialmente relevante en espintrónica, donde estos efectos son clave para determinar el comportamiento de los dispositivos.

Precisamente en este ámbito se centra el grupo de Física e Ingeniería de los Nanodispositivos del Institut Català de Nanociència i Nanotecnologia (ICN2), donde trabaja el científico del CSIC **Juan F. Sierra**. Sus líneas de investigación se enfocan en comprender, explotar y modificar el espín del electrón en sistemas 2D con el objetivo de diseñar nuevos dispositivos nanoelectrónicos.

Heteroestructuras de van der Waals: más allá del grafeno

El grafeno ha sido el material insignia de esta familia. Está formado por una sola capa de átomos de carbono dispuestos en una red hexagonal (similar a un panal de abeja), lo que le confiere propiedades excepcionales: es flexible, muy resistente y permite una alta movilidad electrónica. Además, presenta una característica especialmente interesante: durante el transporte de electrones a través de su estructura, el espín se conserva de forma muy eficiente. Esto se debe a que el grafeno tiene un acoplamiento espín-órbita muy débil. En otras palabras, el movimiento de los electrones y su espín tienen una baja capacidad para influirse y modificarse mutuamente. Gracias a ello, el grafeno es un material ideal para transportar información, no solo mediante la carga eléctrica, sino también a través del espín. Y esa es la base de la espintrónica.

Sin embargo, esta misma propiedad supone también una limitación: la debilidad del acoplamiento espín-órbita dificulta la manipulación del espín, algo esencial para el desarrollo de dispositivos funcionales. Por tanto, aunque el grafeno es un gran punto de partida, por sí solo no es suficiente para cumplir todos los requisitos de un buen material espintrónico.

¿Cómo podemos superar esta limitación? Aquí es donde entran en juego las heteroestructuras 2D: combinaciones de materiales ultradelgados ensamblados como si fueran piezas de LEGO. En estas estructuras, las capas se mantienen unidas mediante fuerzas débiles, conocidas como fuerzas de Van der Waals. Además, aquí aparecen los llamados efectos de proximidad, por los cuales las propiedades físicas de un material pueden transferirse o modificarse debido a la presencia de otro material cercano.

Pero la cosa va aún más allá: las propiedades de estas heteroestructuras también dependen del ángulo relativo entre las capas. A partir de esta idea, una estrategia prometedora consiste en combinar grafeno con otros materiales 2D que le aporten propiedades que no tiene en su forma aislada.

Como explica Juan F. Sierra: “Un buen ejemplo de materiales complementarios al grafeno son los dicalcogenuros de metales de transición (DMT). Estos materiales son muy sensibles a la luz y poseen un fuerte acoplamiento espín-órbita, que en contacto con el grafeno puede transferirse parcialmente a este. Esto facilita el control de las corrientes de espín y ajustar la distancia a la que se propagan en función de su orientación. Además, son muy útiles para desarrollar los llamados dispositivos optoespintrónicos, en los que se combinan los efectos de la luz y del espín, y así conseguir nuevas funcionalidades.”

No obstante, la variedad de fenómenos físicos que tienen lugar en estos sistemas híbridos grafeno/DMT es enorme, y aún estamos en las primeras etapas para comprenderlos.

Objetivo: manipular las corrientes de espín

En definitiva, las heteroestructuras de materiales 2D se perfilan como una de las plataformas más prometedoras para la electrónica del futuro. Uno de los grandes retos

actuales es aprovechar su potencial para comprender, a nivel fundamental, el comportamiento del espín en estos sistemas.

En este contexto, el grupo del Dr. Juan F. Sierra estudia cómo generar, transportar y manipular el espín. Como él mismo señala: “Nuestro objetivo es identificar los mecanismos clave del transporte de espín, mejorar su eficiencia y, al mismo tiempo, lograr controlarlo en estos sistemas híbridos. En combinaciones grafeno/TMD no solo somos capaces de modificar la distancia de propagación de las corrientes de espín, sino que además podemos generar nuevas orientaciones de estas a través de la estimulación con la luz”.

Alcanzar este nivel de control es clave para desarrollar nuevas tecnologías espintrónicas. En los próximos años, los avances en este campo podrían abrir la puerta a dispositivos más rápidos, con menor consumo energético y con mayores capacidades de almacenamiento y procesamiento de información.

Chema Arcos / Lara Coteria / Oriol Roig

comunicacion@csic.es