

Thermal waves observed in semiconductor materials

- A study published in *Science Advances* reports on the unexpected observation of thermal waves in germanium, a semiconductor material, for the first time.
- This phenomenon may allow a significant improvement in the performance of our electronic devices in a near future.
- The study is led by researchers from the Institute of Materials Science of Barcelona (ICMAB, CSIC) in collaboration with researchers from the Universitat Autònoma de Barcelona, and the University of Cagliari.

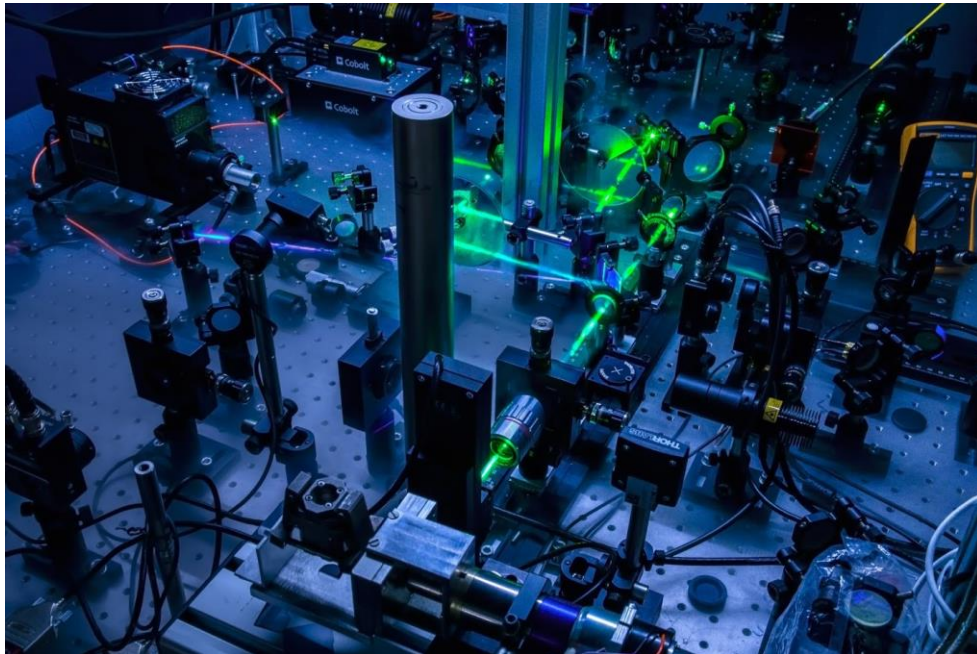


Figure: Amplified frequency-domain thermoreflectance setup used to study the existence of second sound in germanium. Two different lasers are focused onto the surface of the samples using a microscope objective. A rather large combination of optical elements allows to control and modify the spot size and shape, as well as the power and harmonic modulation of the lasers. Cold nitrogen gas is used for better visualization of the lasers optical path. | ICMAB, CSIC

Heat, as we know it, originates from the vibration of atoms, and transfers by diffusion at ambient temperatures. Unfortunately, it is rather difficult to control, and leads to simple and inefficient strategies to manipulate it. This is why, for example, large amounts of residual heat can accumulate in our computers, mobile phones and, in general, most electronic devices.

However, if heat was transported through waves, such as light, it would offer new alternatives to control it, especially through the unique and intrinsic properties of waves.

Thermal waves have been observed to date only in few materials, such as solid helium or, more recently, in graphite. Now, the study published in *Science Advances* by researchers from the Institute of Materials Science of Barcelona (ICMAB, CSIC) in collaboration with researchers from the Universitat Autònoma de Barcelona, and the University of Cagliari, reports on the observation of thermal waves on solid germanium, a semiconductor material used typically in electronics, similar to silicon, and at room temperature. “It was not expected to encounter these wave-like effects, known as second sound, on this type of material, and in these conditions,” says Sebastián Reparaz, ICMAB Researcher at the Nanostructured Materials for Optoelectronics and Energy Harvesting (NANOPTO) Group and leader of this study.

The observation occurred when studying the thermal response of a germanium sample under the effect of lasers, producing a high-frequency oscillating heating wave on its surface. The experiments showed that, contrarily to what was believed until now, heat did not dissipate by diffusion, but it propagated into the material through thermal waves.

Apart from the observation itself, in the study, researchers unveil the approach to unlock the observation of thermal waves, possibly in any material system.

What is second sound and how can it be observed in any material

First observed in the 1960s on solid helium, thermal transport through waves, known as second sound, has been a recurrent subject for researchers who have repeatedly tried to demonstrate its existence in other materials. Recent successful demonstrations of this phenomenon on graphite have revitalized its experimental study.

“Second sound is the thermal regime where heat can propagate in the form of thermal waves, instead of the frequently observed diffusive regime. This type of wave-like thermal transport has many of the advantages offered by waves, including interference and diffraction”, says ICMAB researcher Sebastián Reparaz.

“Wave-like effects can be unlocked by driving the system in a rapidly varying temperature field. In other words, a rapidly varying temperature field forces the propagation of heat in the wave-like regime” explains Reparaz, and adds, “The interesting conclusion of our work is that these wave-like effects could be potentially observed by most materials at a sufficiently large modulation frequency of the temperature field. And, what is even more interesting, its observation is not restricted to some specific materials.”

Applications of second sound in a near future

“The possible applications of second sound are limitless”, says Sebastián Reparaz. Achieving these applications, however, will require a deep understanding on the ways to unlock this thermal propagation regime on any given material. Being able to control heat propagation through the properties of waves opens new ways to design the upcoming generations of thermal devices, in a

similar way to the already established developments for light.

“Specifically, the second sound thermal regime could be used to rethink how we deal with waste heat”, he adds.

From a theoretical point of view, “these findings allow unifying the current theoretical model, which until now considered that materials where this type of wave-like behavior was observed (such as graphite) were very different from the semiconductor materials currently used in the manufacture of electronic chips (such as silicon and germanium)” says F. Xavier Álvarez, researcher at the UAB. “Now all these materials can be described using the same equations. This observation establishes a new theoretical framework that may allow in the not too distant future a significant improvement in the performance of our electronic devices,” adds Álvarez.

Reference article

Observation of second sound in a rapidly varying temperature field in Ge

Albert Beardo, Miquel López-Suárez, Luis Alberto Pérez, Lluç Sendra, Maria Isabel Alonso, Claudio Melis, Javier Bafaluy, Juan Camacho, Luciano Colombo, Riccardo Rurali, F. X. Alvarez, Juan Sebastián Reparaz

Science Advances 2021

Ondas térmicas observadas en materiales semiconductores

- Un estudio publicado en *Science Advances* informa, por primera vez, de la inesperada observación de ondas térmicas en germanio, un material semiconductor.
- Este descubrimiento podría permitir una mejora significativa del rendimiento de nuestros dispositivos electrónicos en un futuro no muy lejano.
- El estudio está liderado por investigadores del Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (ICMAB, CSIC) en colaboración con investigadores de la Universidad Autónoma de Barcelona, y la Universidad de Cagliari.

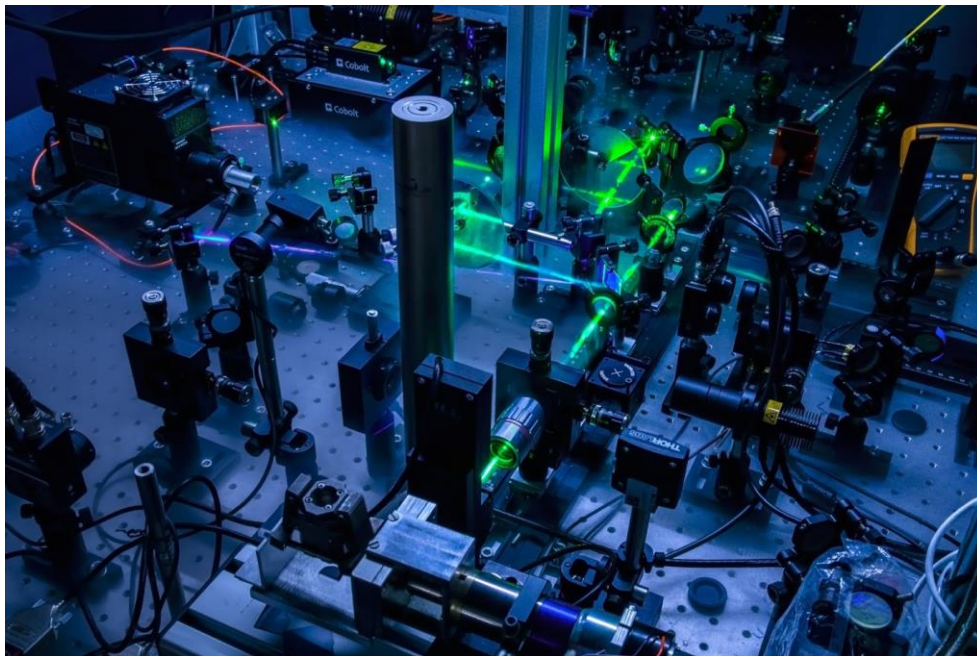


Figura: Montaje de termorreflexión en el dominio de la frecuencia utilizado para estudiar la existencia del segundo sonido en germanio. Se enfocan dos láseres diferentes sobre la superficie de las muestras utilizando un objetivo de microscopio. Una combinación de elementos ópticos permite controlar y modificar el tamaño y la forma del punto de contacto, así como la potencia y la modulación armónica de los láseres. Se utiliza gas nitrógeno frío para una mejor visualización del recorrido óptico de los láseres. | ICMAB, CSIC

El calor, tal y como lo conocemos, se origina cuando los átomos vibran, y se transfiere por difusión, a temperatura ambiente. Por desgracia, el calor es bastante difícil de controlar, y las estrategias para manipularlo resultan bastante ineficaces. Por ejemplo, es común que se acumulen grandes cantidades de calor residual en nuestros ordenadores, teléfonos móviles y, en general, en la mayoría de los dispositivos electrónicos.

Sin embargo, si el calor se transportara a través de ondas, como la luz, ofrecería nuevas alternativas para poderlo controlar, especialmente gracias a las propiedades únicas e intrínsecas de las ondas.

Hasta ahora, las ondas térmicas sólo se habían observado en unos pocos materiales, como en el helio sólido o, más recientemente, en el grafito. Ahora, el estudio publicado en *Science Advances* por investigadores del Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (ICMAB, CSIC) en colaboración con investigadores de la Universidad Autónoma de Barcelona, y de la Universidad de Cagliari, presenta la observación de ondas térmicas en germanio sólido, un material semiconductor utilizado habitualmente en electrónica, similar al silicio, y a temperatura ambiente. "No esperábamos encontrar estos efectos ondulatorios, conocidos como segundo sonido, en este tipo de material, ni en estas condiciones", afirma Sebastián Reparaz, investigador del ICMAB en el Grupo de Materiales Nanoestructurados para la Optoelectrónica y la Captación de Energía (NANOPTO) y líder de este estudio.

El descubrimiento se produjo al estudiar la respuesta térmica de una muestra de germanio bajo el efecto de un láser, produciendo una onda térmica oscilante de alta frecuencia en su superficie. Los experimentos demostraron que, contrariamente a lo que se creía hasta ahora, el calor no se disipaba por difusión, sino que se propagaba en el material a través de ondas térmicas.

Aparte de la observación en sí, en el estudio se desvela el enfoque para conseguir observar las ondas térmicas, posiblemente en cualquier sistema material.

Qué es el segundo sonido y cómo puede observarse en cualquier material

Observado por primera vez en la década de 1960 en el helio sólido, el transporte térmico a través de ondas, conocido como segundo sonido, ha sido un tema recurrente en la comunidad científica, que ha intentado demostrar repetidamente su existencia en otros materiales. Las recientes demostraciones exitosas de este fenómeno en el grafito han revitalizado su estudio experimental.

"El segundo sonido es el régimen térmico en el que el calor puede propagarse en forma de ondas térmicas, en lugar del régimen difusivo observado con frecuencia. Este tipo de transporte térmico en forma de onda tiene muchas de las ventajas que ofrecen las ondas, como la interferencia y la difracción", afirma el investigador del ICMAB Sebastián Reparaz.

"Estos efectos ondulatorios se pueden desbloquear introduciendo el sistema en un campo de temperatura que varía rápidamente. En otras palabras, un campo de temperatura que varía rápidamente fuerza la propagación del calor en el régimen ondulatorio", explica Reparaz, y añade: "La interesante conclusión de nuestro trabajo es que estos efectos ondulatorios podrían ser potencialmente observados en la mayoría de los materiales a una frecuencia de modulación del

campo de temperatura suficientemente grande. Su observación no se limita a algunos materiales específicos, lo cual es muy interesante".

Aplicaciones del segundo sonido en un futuro próximo

"Las posibles aplicaciones del segundo sonido son ilimitadas", afirma Sebastián Reparaz. Sin embargo, será necesario conocer a fondo las formas de controlar este régimen de propagación térmica en cualquier material para conseguir aplicarlas. Poder controlar la propagación del calor a través de las propiedades de las ondas abre nuevas vías para diseñar las próximas generaciones de dispositivos térmicos, de forma similar a los ya desarrollados y establecidos para la luz. "En concreto, el régimen de ondas térmicas podría utilizarse para replantear cómo tratamos el calor residual", añade.

Desde el punto de vista teórico, "estos hallazgos permiten unificar el modelo teórico actual, que hasta ahora consideraba que los materiales en los que se observaba este tipo de comportamiento ondulatorio (como el grafito) eran muy diferentes de los materiales semiconductores que se utilizan actualmente en la fabricación de chips electrónicos (como el silicio y el germanio)", afirma F. Xavier Álvarez, investigador de la UAB. "Ahora todos estos materiales pueden describirse utilizando las mismas ecuaciones. Esta observación establece un nuevo marco teórico que nos permitirá, en un futuro no muy lejano, una mejora significativa en el rendimiento de nuestros dispositivos electrónicos", añade Álvarez.

Artículo de referencia

Observation of second sound in a rapidly varying temperature field in Ge

Albert Beardo, Miquel López-Suárez, Luis Alberto Pérez, Lluc Sendra, Maria Isabel Alonso, Claudio Melis, Javier Bafaluy, Juan Camacho, Luciano Colombo, Riccardo Rurali, F. X. Alvarez, Juan Sebastián Reparaz

Science Advances 2021

Ones tèrmiques observades en materials semiconductors

- Un estudi publicat a *Science Advances* informa, per primera vegada, de la inesperada observació d'ones tèrmiques en germani, un material semiconductor.
- Aquest descobriment podria permetre una millora significativa del rendiment dels nostres dispositius electrònics en un futur no gaire llunyà.
- L'estudi està liderat per investigadors de l'Institut de Ciència de Materials de Barcelona (ICMAB, CSIC) en col·laboració amb investigadors de la Universitat Autònoma de Barcelona, i la Universitat de Cagliari.

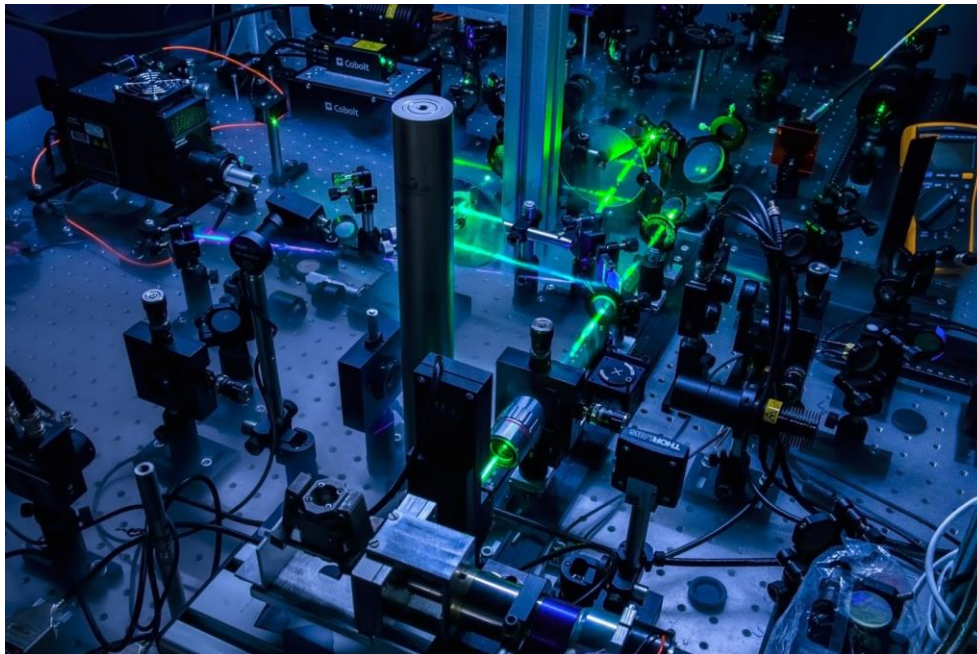


Figura: Muntatge de termorreflexió en el domini de la freqüència utilitzat per a estudiar l'existència del segon so en el germani. S'enfoquen dos làsers diferents sobre la superfície de les mostres utilitzant un objectiu de microscopi. Una combinació de bastants elements òptics permet controlar i modificar la grandària i la forma del punt de contacte, així com la potència i la modulació harmònica dels làsers. S'utilitza gas nitrogen fred per a una millor visualització del recorregut òptic dels làsers. | ICMAB, CSIC

La calor, tal com la coneixem, s'origina quan els àtoms vibren, i es transfereix per difusió, a temperatura ambient. Per desgràcia, la calor és bastant difícil de controlar, i les estratègies per a manipular-la resulten bastant ineficaces. Per exemple, és per això que s'acumulen grans quantitats de calor residual en els nostres ordinadors, telèfons mòbils i, en general, a la majoria dels dispositius electrònics.

Ara bé, si la calor es transportés a través d'ones, com la llum, oferiria noves alternatives per a poder-la controlar, especialment gràcies a les propietats úniques i intrínseques de les ones.

Fins ara, les ones tèrmiques només s'havien observat en molt pocs materials, com a l'heli sòlid o, més recentment, al grafit. Ara, l'estudi publicat a *Science Advances* per investigadors de l'Institut de Ciència de Materials de Barcelona (ICMAB, CSIC) en col·laboració amb investigadors de la Universitat Autònoma de Barcelona, i de la Universitat de Cagliari, presenta l'observació d'ones tèrmiques en germani sòlid, un material semiconductor utilitzat habitualment en electrònica, similar al silici, i a temperatura ambient. "No esperàvem trobar aquests efectes ondulatoris, coneguts com a segon so, en aquest tipus de material, ni en aquestes condicions", afirma Sebastián Reparaz, investigador de l'ICMAB al Grup de Materials Nanoestructurats per a l'Optoelectrònica i la Captació d'Energia (NANOPTO) i líder d'aquest estudi.

El descobriment es va produir en estudiar la resposta tèrmica d'una mostra de germani sota l'efecte d'un làser, el qual va produir una ona tèrmica oscil·lant d'alta freqüència a la seva superfície. Els experiments van demostrar que, contràriament al que es creia fins ara, la calor no es va dissipar per difusió, sinó que es va propagar en el material a través d'ones tèrmiques.

A part de l'observació en si, a l'estudi es revela l'enfocament per a aconseguir observar ones tèrmiques, possiblement en qualsevol sistema material.

Què és el segon so i com pot observar-se en qualsevol material

Observat per primera vegada a la dècada de 1960 en heli sòlid, el transport tèrmic a través d'ones, conegut com a segon so, ha estat un tema recurrent en la comunitat científica, que ha intentat demostrar repetidament la seva existència en altres materials. Les recents demostracions exitoses d'aquest fenomen en el grafit han revitalitzat el seu estudi experimental.

"El segon so és el règim tèrmic en el qual la calor pot propagar-se en forma d'ones tèrmiques, en comptes del règim difusiu observat amb freqüència. Aquest tipus de transport tèrmic en forma d'ona té molts dels avantatges que ofereixen les ones, com la interferència i la difracció", afirma l'investigador de l'ICMAB Sebastián Reparaz.

"Aquests efectes ondulatoris es poden desbloquejar introduint el sistema en un camp de temperatura que varia ràpidament. En altres paraules, un camp de temperatura que varia ràpidament força la propagació de la calor en un règim ondulatori", explica Reparaz, i afegeix: "La interessant conclusió del nostre treball és que aquests efectes ondulatoris podrien ser potencialment observats en la majoria dels materials a una freqüència de modulació del camp de temperatura prou gran. La seva observació no es limita a alguns materials específics, la qual cosa és molt interessant".

Aplicacions del segon so en un futur proper

"Les possibles aplicacions del segon so són il·limitades", afirma Sebastián Reparaz. No obstant, serà necessari conèixer a fons les maneres de controlar aquest règim de propagació tèrmica en qualsevol material per a aconseguir aplicar-les. Poder controlar la propagació de la calor a través de les propietats de les ones obre noves vies per a dissenyar les pròximes generacions de dispositius tèrmics, de manera similar a aquells ja desenvolupats i establerts per a la llum. "En concret, el règim d'ones tèrmiques podria utilitzar-se per a replantejar com tractem la calor residual", afegeix.

Des del punt de vista teòric, "aquests descobriments permeten unificar el model teòric actual, que fins ara considerava que els materials en els quals s'observava aquest tipus de comportament ondulatori (com el grafit) eren molt diferents dels materials semiconductors que s'utilitzen actualment en la fabricació de xips electrònics (com el silici i el germani)", afirma F. Xavier Álvarez, investigador de la UAB. "Ara tots aquests materials poden descriure's utilitzant les mateixes equacions. Aquesta observació estableix un nou marc teòric que ens permetrà, en un futur no gaire llunyà, una millora significativa en el rendiment dels nostres dispositius electrònics", afegeix Álvarez.

Article de referència

Observation of second sound in a rapidly varying temperature field in Ge

Albert Beardo, Miquel López-Suárez, Luis Alberto Pérez, Lluc Sendra, Maria Isabel Alonso, Claudio Melis, Javier Bafaluy, Juan Camacho, Luciano Colombo, Riccardo Rurali, F. X. Alvarez, Juan Sebastián Reparaz

Science Advances 2021