

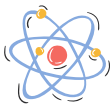


Universidad Autónoma del Estado de México

Facultad de Ciencias



"INTRODUCCIÓN A LOS METAMATERIALES TÉRMICOS Y SUS APLICACIONES"



Daniela Flores Mateos, Lorena Romero Salazar
Laboratorio de Nanotermodinámica y Sistemas
complejos
@uaemex.mx; lors@uaemex.mx
dfloresm231@alumno.uaemex.com



Históricamente, la evolución de nuestra sociedad se ha dado gracias a la habilidad de crear e implementar materiales que, satisfacen nuestras necesidades; es así como, la ciencia de materiales se encarga de investigar las propiedades y estructura de los mismos. En la actualidad y con la aplicación de la Nanotecnología y Nanoingeniería, se han desarrollado nuevos materiales con propiedades de transporte modulables y con una distribución espacial no uniforme, que se conocen como metamateriales, son aquellos que no existen por sí mismos en la naturaleza y poseen propiedades más allá de las atribuidas a sus componentes o a los subsistemas que los conforman. Estos metamateriales pueden ser de carácter electromagnético, óptico, acústico o térmico. En este trabajo se abordan los metamateriales térmicos. Un ejemplo de estos, son los osciladores de baja potencia térmica de escala nanométrica, acoplados en las cavidades defectuosas de un cristal fotónico resonante a escala micrométrica para generar THz o radiación infrarroja, patentados por Raytheon Company en 2010. También se abordan los conceptos de termodinámica y fenómenos de transporte que son relevantes para su descripción y se indicará por qué son considerados nuevos materiales. Por último, se resaltarán la importancia de las aplicaciones que tienen para múltiples disciplinas, tales como la ingeniería, el diseño, la arquitectura, entre otras.

La aportación de la termodinámica para sistemas complejos como los metamateriales térmicos seguirá siendo un tema innovador, para ampliar los estudios y las múltiples aplicaciones que estos pueden traer y así generar un bien colectivo, a las generaciones futuras además de la nuestra.

En termodinámica la transferencia de calor es un fenómeno fundamental del transporte de energía, generalmente inducido por una diferencia de temperatura en el espacio. Este fenómeno siempre ocurre desde un cuerpo más caliente a uno más frío, como resultado de la Segunda Ley de la Termodinámica. La transferencia de calor ocurre hasta que los cuerpos y su entorno alcancen el equilibrio térmico. Pero si aparecen gradientes no lineales en otras variables, como una distribución in-homogénea en la densidad, esto resulta en efectos acoplados sorprendentes.

La transferencia de calor puede ocurrir mediante convección, radiación o conducción y aunque estos tres procesos pueden ocurrir al mismo tiempo, también puede ser que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos.

La ecuación de conducción de calor es una ecuación diferencial parcial que describe la distribución de calor (o el campo de temperatura) en un cuerpo dado a lo largo del tiempo. El conocimiento detallado del campo de temperatura es muy importante en la conducción térmica a través de materiales.

La ecuación del calor se deriva de la ley de Fourier y la conservación de la energía

$$\vec{q} = -k\nabla T$$

En las últimas décadas, los avances en la ciencia de los materiales y la física han estimulado un renacimiento de la investigación sobre la transferencia de calor. Por un lado, están surgiendo nuevos enfoques con fines tradicionales de calefacción/refrigeración y la captación de energía, en términos de su mejor eficiencia, precisión, adaptabilidad, sintonía, compactividad, etc.

La capacidad de manipular el camino de la propagación de la energía es un rasgo que distingue a los materiales artificiales de los materiales ordinarios. En un material sólido que soporta corriente de calor, las propiedades inducidas por conductividades térmicas dispuestas artificialmente pueden ser contraintuitivas. Mediante estructuras artificiales bien diseñadas en lugar de las propiedades intrínsecas de los materiales naturales, la transferencia de calor se puede manipular aproximadamente de forma arbitraria.



Los metamateriales térmicos tienen propiedades sorprendentes en la transferencia de calor más allá de los materiales naturales debido a sus estructuras artificiales bien diseñadas. La idea de los metamateriales térmicos ha transformado completamente el diseño de dispositivos funcionales térmicos y permite modular el flujo de calor, considerando ya no un coeficiente de conductividad sino un tensor de conductividad κ .



Hasta ahora, la teoría que sustenta a los metamateriales térmicos se divide en dos categorías:

- Teoría fenomenológica macroscópica
- Teoría fonónica/fotónica microscópica

Por lo que las aplicaciones de los metamateriales térmicos se pueden desarrollar de manera macroscópica y microscópica.

Conducción de calor macroscópica en metamateriales térmicos conductivos

$$\rho c_p \partial T / \partial t = \nabla \cdot (\kappa \cdot \nabla T) + g(r, t)$$

donde $g(r, t)$ se obtiene de la Termodinámica Irreversible (Romero-Salazar L., 2018) y puede identificarse como contribuciones acopladas al flujo de calor por radiación, convección o por agentes externos de diferente naturaleza.

Una condición en la interfaz de dos regiones A y B, la temperatura y el flujo de calor normal a la interfaz deben ser funciones continuas

$$T_A = T_B$$

$$-(\kappa_A \cdot \nabla T_A) \cdot n = -(\kappa_B \cdot \nabla T_B) \cdot n$$

Escala Macroscópica

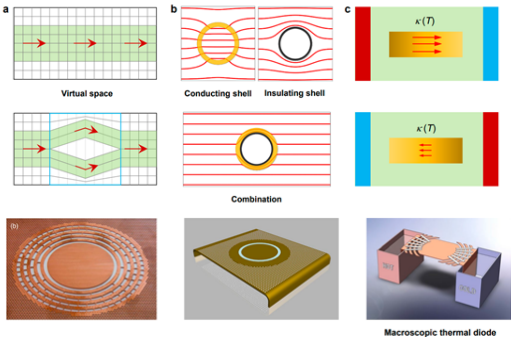


Figura 1. Ejemplo de la descripción del campo de temperaturas y transporte de calor en metamaterial térmico.

Escala Microscópica

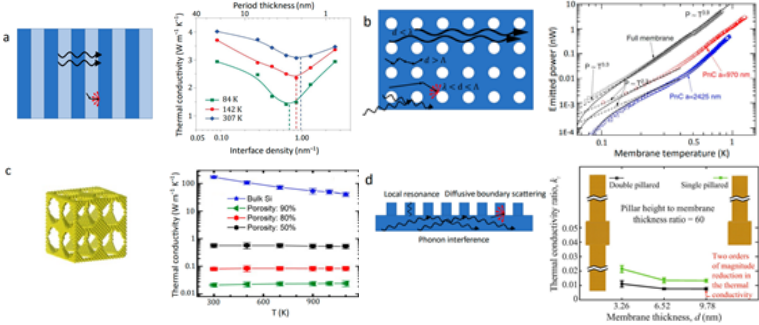


Figura 2. Ejemplo de la descripción microscópica de conductividad térmica en metamateriales térmicos mediante simulaciones.

Imágenes incluidas para fines didácticas recuperadas de Li, Y., et al. (2021). de <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00283-2>

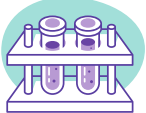
La conductividad térmica de la mayoría de los materiales naturales es isotrópica (κ es un escalar), pero para materiales monocristalinos como el grafito, la orientación intrínseca de la red podría inducir la anisotropía. Cuando la conductividad térmica es anisotrópica, ahora κ es un tensor, es simétrica para materiales comunes según el teorema de reciprocidad de Onsager. Además si incluimos a los campos magnéticos, la conductividad térmica efectiva de un material podría ser asimétrica debido al efecto Hall térmico.

Para la mayoría de los materiales $\kappa = \kappa(T)$. Para algunos materiales de cambio de fase esta dependencia de la temperatura es drástica y se puede utilizar para construir diodos térmicos, reguladores e interruptores. Las teorías tradicionales de transformación sólo se aplican a materiales lineales cuya conductividad térmica es independiente de la temperatura.

Actualmente las actividades de investigación relevantes sobre metamateriales térmicos se centran en una forma específica, ya sea la conducción térmica, la radiación o la convección, a cierta escala de longitud (macroescala o nanoescala), y estas actividades generalmente se separan de otros campos de investigación. Sin embargo, se requiere de un mayor esfuerzo para diseñar una conductividad térmica con variaciones espaciales, es por ello que los futuros desarrollos encaminados en esta dirección se benefician de los diseños ya existentes de metamateriales térmicos conductivos, aunque aún se enfrentan a desafíos de producción en masa y de fuentes de conducción precisas.

Conclusiones

Podemos concluir haciendo énfasis en la importancia que tiene el construir conexiones más sólidas sobre la teoría y la aplicación de estos nuevos materiales, extendiendo el análisis de fenómenos adicionales acoplados, como el efecto de los modos de vibración del sonido, fonones, los cuales aportarán a elementos adicionales a considerar en las aplicaciones de los metamateriales. También revisten importancia en problemas multifísicos y a multiescala, como la disipación de calor en dispositivos electrónicos y baterías, la recolección de energía termofotovoltaica, la regulación de la temperatura termoeléctrica, entre otros.



Agradecimientos

Las autoras agradecen el apoyo de la SIEA-UAEMéx a través del proyecto 6241/2020CIA que permitirá realizar experimentación en metamateriales en una siguiente fase.

Referencias

- Fan, C. Z., Gao, Y., & Huang, J. P. (2008). Shaped graded materials with an apparent negative thermal conductivity. Applied Physics Letters, 92(25), 251907. Disponible en <https://doi.org/10.1063/1.2951600>
- Li, Y., Li, W., Han, T., Zheng, X., Li, J., Li, B., Fan, S., & Qiu, C.-W. (2021). Transforming heat transfer with thermal metamaterials and devices. Nature Reviews Materials, 6(6), 488-507. Disponible en <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00283-2>
- Romero-Salazar, L. (2018). Tópicos en termodinámica de procesos irreversibles y sistemas complejos (Coord.), Ediciones EÓN, Universidad Autónoma del Estado de México. Disponible en <http://hdl.handle.net/20.500.11799/98696>
- Wang, J., Dai, G., & Huang, J. (2020). Thermal Metamaterial: Fundamental, Application, and Outlook. IScience, 23(10), 101637. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101637>
- Zemansky M.W, Dittman R. H. (1985). Calor y Termodinámica. McGraw-Hill