

Avance y Perspectiva

Revista de divulgación del CINVESTAV

Semiconductores degenerados: aliados fuertes e inesperados de los sistemas de aire acondicionado

Karina Galache · Tuesday, January 11th, 2022

Categorías: [Ciencias Exactas](#), [Zona Abierta](#)

La mayoría de los problemas globales que aquejan a la humanidad tiene muchas de las características de un círculo vicioso y el fenómeno del calentamiento global no es la excepción. Con el incremento de la población durante las últimas décadas, industrias de todo tipo se han visto en la necesidad de aumentar su producción para satisfacer las necesidades de la vida cotidiana, lo que ha ocasionado un aumento considerable del consumo energético. En México, esta energía proviene (en su mayoría) de la quema de combustibles fósiles, lo que conlleva a un incremento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), por ejemplo, dióxido de carbono, metano, vapor de agua, entre otros, que absorben el calor radiado por la superficie de la tierra y lo emiten de vuelta, provocando el aumento gradual de la temperatura del planeta y contribuyendo directamente al calentamiento global [IEA, 2018]. Debido al aumento de temperatura, las industrias, viviendas y otras edificaciones tienen la necesidad creciente de utilizar sistemas de aire acondicionado (SAA, comúnmente llamados “climas”, “refrigeración” o “minisplits”), incluso en regiones donde no era requerido su uso. De acuerdo con el INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática), en 2018 se contabilizaron alrededor de 7 millones de SAA tan solo en las viviendas particulares de México [INEGI, 2018]. Casi todos ellos utilizan energía eléctrica generada a partir de combustibles fósiles incrementando aún más el calentamiento global con todas sus ya conocidas consecuencias, lo que nos conduce al inicio del ciclo y, por lo tanto, cierra el “círculo vicioso” donde se ve que esta forma de enfrentar los efectos del cambio climático se ha convertido en parte del problema (Figura 1).



Figura 1. Círculo vicioso: los sistemas de aire acondicionado se vuelven parte del problema al contribuir con las emisiones de GEI.

La ruta principal por la que la temperatura del interior de las edificaciones aumenta es a través de la exposición al calor proveniente del sol. El calor se puede entender como la energía transportada entre dos sistemas o entre un sistema y su entorno, debido a una diferencia de temperatura entre ambos. Es decir, es energía en movimiento, ya sea a través de la estructura interna de la materia (conducción), por el movimiento de grandes masas de material (convección), o por la emisión de ondas electromagnéticas (OEM) como la luz visible o las ondas de radiofrecuencias (radiación). En

el caso de la radiación solar, la energía se transfiere a través de OEM ultravioletas (UV), visibles (Vis) e infrarrojas (IR) que, al interactuar con los materiales de las edificaciones, les brindan la energía que causa el aumento de temperatura en su interior [Incropera & DeWitt, 1999].

Otro factor que contribuye al calentamiento de los interiores es que todos los materiales tienen una emisión natural de OEM que depende de la temperatura; cuando ésta alcanza la temperatura ambiente, las OEM corresponderán al IR y es ahí donde se encuentra lo que comúnmente se conoce como sensación de calor (IR térmico). De esta manera, el calentamiento de las edificaciones dependerá también de qué tan bueno sea un material para desprender calor, propiedad que se mide a través de la “emisividad”, que es la relación entre la emisión de radiación del material y la de un cuerpo negro (cuerpo idealizado con la capacidad de deshacerse de toda la energía que absorbe). Por lo tanto, entre mayor sea la emisividad de un material mayor es su capacidad de emanar calor [Tipler & Mosca, 2010].

En la actualidad, existen muchos materiales utilizados en la industria de la construcción para fabricar paredes con una tendencia hacia un comportamiento adiabático, esto es, paredes que no permitan el intercambio de calor entre el interior y el exterior. El vidrio ha sido ampliamente utilizado por este sector, principalmente porque provee luz natural (disminuye el uso de luz artificial por lo que se minimiza el consumo energético), proporciona protección contra agentes ambientales –como el viento y la lluvia– preservando la visibilidad hacia el exterior y, además, ofrece características arquitectónicas decorativas. Sin embargo, el vidrio permite el paso del 86% de la energía proveniente del sol, contribuyendo enormemente al incremento de la temperatura en interiores. Esto conlleva al aumento de la energía consumida por los SAA y, por lo tanto, a un gasto económico mayor, además de los efectos ambientales mencionados. Por lo anterior, parte de la comunidad científica y tecnológica ha enfocado sus esfuerzos al desarrollo de metodologías y materiales que minimicen el fenómeno del aumento de la temperatura en interiores cuando la radiación solar atraviesa el vidrio. Dentro de la gran variedad de propuestas estudiadas para mitigar este problema, algunas han alcanzado aplicaciones reales, es decir, existen edificaciones que utilizan estos avances científico-tecnológicos e incluso su uso está regulado en algunas ciudades de Estados Unidos [Karma, 2014] y en algunos países de Europa [UNECE, 2020]. Lo que se ha hecho, principalmente, es recubrir la superficie de los vidrios con capas ultradelgadas (es decir, de espesores del orden de los nanómetros, $1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$, ... ¡100 mil veces menos que el grosor de un cabello...!) de metales preciosos como la plata, conocidas como *recubrimientos de baja emisividad* o *Low-E* (del inglés low emissivity).

La razón para utilizar plata se sustenta en las partículas subatómicas más fundamentales e importantes de los metales: los electrones libres (e_f), que son aquellos que pueden viajar libremente en el metal sin estar asociados con algún átomo en particular. Esta característica –de todos los metales– es la responsable de su alta capacidad para conducir la electricidad y, aunque no es tan conocida, también les confiere una forma especial de interactuar con la luz, por ejemplo, la de ser opacos, que presenten su brillo característico, y que tengan baja emisividad. Entonces, para aplicaciones donde la transparencia juega un papel importante (como en el vidrio) es imprescindible utilizar plata, pero como recubrimientos ultradelgados, los cuales son fabricados empleando metodologías altamente especializadas; esto llevará a incrementar los costos de producción, por lo que una parte importante de la sociedad tendrá acceso limitado a esta tecnología. Por otro lado, el uso de la forma de recubrimiento hace que sea inevitable recurrir a una protección adicional para la plata, con la finalidad de que el material no se oxide por el contacto con el ambiente, ya que perdería por completo su capacidad para bloquear el calor. Con esta

perspectiva, el desarrollo de estos recubrimientos sobre vidrio presenta un reto para los científicos y tecnólogos durante las últimas décadas, quienes buscan ofrecer materiales alternativos fabricados con procesos viables que puedan aprovecharse por una amplia gama de sectores industriales.

Existe una opción de materiales alternativos como recubrimientos Low-E, los cuales poseen propiedades comparables con las de las capas ultradelgadas de plata y han estado en el foco de atención de este tipo de investigaciones en años recientes; estos materiales se conocen como *semiconductores degenerados*. Para abordar este concepto con mayor claridad, primero hay que recordar que, desde el punto de vista de la habilidad para conducir la electricidad, los materiales se clasifican en superconductores, conductores, aislantes y semiconductores. Los superconductores y conductores son excelentes materiales eléctricos debido a que tienen una alta concentración de e_f . Los aislantes impiden el flujo de la corriente eléctrica, precisamente por su carencia de e_f , es decir, todos sus electrones están participando en enlaces químicos o están asociados con átomos específicos (electrones enlazados, e_b , sin libertad de movimiento). Los semiconductores son aquellos que pueden comportarse como aislantes o como conductores dependiendo de factores externos tales como la temperatura (excitación térmica), la radiación incidente (excitación luminosa) e, incluso, si se les ha agregado alguna impureza especial, lo que también es conocido como dopaje –término usado en analogía con el mundo deportivo– (excitación química), debido a que sus propiedades están determinadas por los e_b . Estos últimos, son los principales actores en los semiconductores, ya que, a través de los factores externos mencionados, se pueden convertir en e_f .

Pero ¿cómo es que un semiconductor puede ser degenerado? Según la RAE (Real Academia Española), el término degenerado hace referencia a una persona que tiene un comportamiento anormal a lo moralmente aceptado; seguramente esta es la definición más conocida, pero esta palabra también es utilizada en diferentes áreas científicas. Por ejemplo, para la Física Moderna, cuando en una energía determinada existe más de un estado permitido posible (entiéndase “estado permitido” como el conjunto de parámetros que describen la situación actual de una partícula como velocidad, posición, etcétera), cada uno de estos estados se dice que está degenerado; en Biología, degenerado se refiere a la redundancia que ocurre en el código genético debido a que existen más codones que aminoácidos (sustancias orgánicas que se encuentran en la información genética de un individuo). En el caso específico de los semiconductores, el término hace alusión a que su comportamiento eléctrico es más parecido al de un conductor que al de un aislante, es decir, que tienen una alta concentración de portadores de carga eléctrica (sean electrones libres o huecos –entiéndase por hueco el espacio vacío que deja la ausencia de un electrón–). Sin embargo, su respuesta a la luz es muy diferente a la de los metales, ya que los semiconductores degenerados pueden dejar pasar luz de energía moderada (¡recuerden que los metales son opacos!), esto es, pueden ser transparentes a la luz visible y al mismo tiempo bloquear la radiación IR y UV.

En los semiconductores degenerados, los e_b se pueden liberar al aplicarles energía con valores muy específicos dentro del espectro solar. Así, entre más e_f tengan, la liberación de los e_b se obstaculiza, por lo que la energía necesaria para que la liberación ocurra tiende a aumentar, lo que provoca que estos materiales tengan un aumento de la transparencia en el espectro visible (radiación de menor energía), pues solo luz de energías hacia el UV (radiación de mayor energía) será capaz de liberar electrones enlazados. Este proceso se asemeja a cuando hemos asistido a un evento masivo como un concierto, y cuando termina se tiene prisa por salir del lugar; seríamos como e_b recién excitados y los e_f serían todas las personas que ya están amontonadas en la salida del lugar, por lo que se requeriría de un gran esfuerzo (mayor energía) para escapar de ahí.

Con el propósito de incrementar sus portadores de carga eléctrica (o simplemente “portadores”) hay algunos semiconductores que son intencionalmente dopados para convertirlos en degenerados. Por ejemplo, en el caso del silicio (semiconductor natural en el que se basa toda la industria de la electrónica), ya sea que se dope con impurezas que le aporten e_i o huecos, el aumento de su concentración de portadores ocurrirá hasta hacerse degenerado (este es un ejemplo de semiconductores degenerados extrínsecos). Por otra parte, también hay semiconductores que de manera natural tienen una alta concentración de portadores como consecuencia del arreglo espacial de largo alcance de sus átomos, moléculas o iones (a este arreglo se le denomina cristal), por ejemplo, el mineral de sulfuro de cobre conocido como covelita (este es un ejemplo de semiconductores degenerados intrínsecos).

Ahora que sabemos lo que es un semiconductor degenerado, es momento de identificar cómo pueden hacer frente al aumento de temperatura en los interiores de las edificaciones que usan vidrio. Cada sección del espectro de radiación solar capaz de provocar un aumento de temperatura encuentra obstáculos cuando choca con un semiconductor degenerado, pues los electrones libres y enlazados de este material funcionan como escudo. Iniciando con la luz más energética, la UV, ésta es consumida (absorbida) por los e_b del semiconductor degenerado, ya que su energía es aprovechada para convertirlos en e_i , evitando que tanto el vidrio como los materiales del interior de una edificación se calienten de manera indirecta al interactuar con luz UV. Ahora bien, la luz visible no es capaz de interactuar con ninguno de los electrones protagónicos de estos semiconductores porque, por un lado, tiene más energía de la que pueden bloquear los e_i y por otro, menos de la que necesitan los e_b para liberarse. Así, esta luz logra pasar a través del recubrimiento y del vidrio (se transmite) sin mayor problema. Hasta este punto, ya debemos tener en mente que los e_i son los responsables de la radiación IR (la reflejarán) del mismo modo que lo hacen en los recubrimientos de plata. Esta interacción entre los electrones y la radiación en un semiconductor degenerado les permitirá alcanzar valores de emisividad útiles para el área de recubrimientos Low-E.

Hablando en términos cuantitativos, la emisividad toma valores entre 0 y 1 y depende de la longitud de onda y del ángulo de incidencia de las OEM, y también de la temperatura; con esto se tiene que la emisividad del vidrio es 0.84, la de la plata es de 0.02 y la del oro es de 0.01, por mencionar algunos ejemplos. Para que un recubrimiento funcione idealmente como Low-E debe tener las siguientes características: transparencia en la región visible mayor al 75%, alta concentración de portadores (e_i o huecos, del orden de 10^{20} cm^{-3}) y un valor de emisividad ≤ 0.2 [Huang, Wang, Xu, Lu, & Yuan, 2008]. Además, se requiere que los materiales utilizados sean de alta calidad para maximizar su desempeño, abundantes en la corteza terrestre para minimizar el precio del producto final y amigables con el ambiente.

El grupo interinstitucional de investigación “Diseño y Optimización de Recubrimientos Avanzados (DORA-Lab)” tiene entre sus intereses principales el desarrollo de recubrimientos semiconductores degenerados que alcancen las características mencionadas para aplicarlos como recubrimientos Low-E. Los materiales más representativos que son estudiados son el óxido de zinc dopado con aluminio (AZO) y el sulfuro de cobre covelita (CuS-cov).

Los recubrimientos AZO pertenecen a la familia de los óxidos conductores transparentes (TCO, por sus siglas en inglés) que son semiconductores degenerados extrínsecos. Cualitativamente, son de alta transparencia (lo que asegura conservar la característica de iluminación natural del vidrio) y

presentan valores promedio de emisividad entre 0.15 y 0.17, que se vuelven competitivos comparados con los de la plata y el oro, cuando se consideran algunas ventajas adicionales [Arbab, Shelestak, & Harris, 2005], tales como que el vidrio recubierto con un TCO no necesita de una protección adicional, a diferencia de los recubrimientos de plata, por lo que los costos de producción no se verían incrementados. Además, en el AZO sus componentes elementales son más abundantes que el oro y la plata. En DORA-Lab, los recubrimientos AZO se desarrollan mediante una metodología de punta conocida como ALD (Atomic Layer Deposition) (ver Figura 2). Este método es compatible con los procesos más modernos de fabricación de dispositivos electrónicos que utilizan la tecnología “touch” como los “smartphones”, las “lap-tops”, las pantallas planas e incluso las computadoras de escritorio. Estos recubrimientos son una de las bases para el impulso de lo que hoy conocemos como “Edificios Inteligentes”.

Por otro lado, el CuS-cov pertenece a la familia de los semiconductores degenerados intrínsecos. Este material tiene una estructura cristalina que le permite mantener una concentración de portadores entre 10^{19} y 10^{22} cm^{-3} de manera natural, es decir, sin necesidad de dopaje. Así, cuando este material tiene un espesor aproximado a 100 nanómetros, la radiación térmica recibida es reflejada casi en su totalidad. Cabe mencionar que una característica de este material es su color verde oscuro, lo que provoca que el porcentaje de transparencia se mantenga entre 40 y 60%, a pesar de ello y dado el incremento del mercado de los recubrimientos Low-E, este material puede ser aplicado en vidrios para edificaciones donde no sea indispensable una alta iluminación, como en los vidrios decorativos, ventanas de autobuses, salas de reuniones, entre otros [Ramírez-Esquivel et al., 2017]. En cuanto a sus componentes elementales, se encuentran en el mismo porcentaje de abundancia que los del AZO. En DORA-Lab, el CuS-cov es sintetizado a través de una metodología conocida como “adsorción y reacción sucesiva de capas iónicas” (SILAR, por sus siglas en inglés) (ver Figura 2). SILAR, es un método químico en solución de tipo cíclico, que consta de cuatro pasos donde el vidrio se sumerge en diferentes soluciones acuosas que contienen los iones de interés que llevarán a la formación del CuS-cov. Controlando los parámetros de síntesis como concentración de las soluciones, temperatura, tiempos de permanencia en las soluciones, velocidad de depósito y número de ciclos, se obtienen recubrimientos con las propiedades adecuadas para desempeñarse como Low-E.



Figura 2. Películas de AZO y CuS-cov para su aplicación como recubrimientos Low-E sintetizados por ALD y SILAR, respectivamente.

Aún queda mucho trabajo por hacer en México en este campo, pues en la actualidad el uso de recubrimientos Low-E es muy limitado y, en este sentido, DORA-Lab está contribuyendo con su granito de arena. Con el desarrollo de estas investigaciones resulta prometedor pensar que en un futuro próximo los recubrimientos Low-E se puedan aplicar y que esto lleve a generar políticas públicas (como ya ocurre en otros países) que fomenten el uso de estas tecnologías que ayudan a cuidar el ambiente y a reducir el consumo de la energía eléctrica, mientras se mantiene una temperatura agradable dentro de las edificaciones. Sin importar que tan difícil pueda ser preparar recubrimientos Low-E, ya sea mediante tecnologías de punta o a través de métodos alternativos –como los métodos químicos en solución–, es claro que los semiconductores degenerados son unos aliados fuertes e inesperados para ayudar a los sistemas de aire acondicionado a mitigar los cambios de temperatura en el interior de las edificaciones, ofreciendo confort a la sociedad con la minimización del gasto económico.

Referencias

- Arbab, M., Shelestak, L. J., & Harris, C. S. (2005). Value-Added Flat-Glass Products for the Building, Transportation Markets, Part 2. *American Ceramic Society Bulletin*, 84(4), 34–38. Retrieved from <http://www.sglavo.it/Contacts/Vetro/STV0607/Vetro lowE.pdf>
- Huang, S., Wang, Z., Xu, J., Lu, D., & Yuan, T. (2008). Determination of optical constants of functional layer of online Low-E glass based on the Drude theory. *Thin Solid Films*, 516(10), 3179–3183. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.08.137>
- IEA. (2018). World energy outlook 2018. *World Energy Outlook*, 1–14.
- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor* (4a. ed.; P. E. Roig-vazquez, Ed.). Edo. de México: Prentice Hall.
- INEGI. (2018). *Primera encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares* (ENCEVI). Retrieved from <http://www.beta.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/EstSociodemo/ENCEVI2018.pdf>
- Karma, S. (2014). Windows and Building Envelope Research and Development: Roadmap for emerging technologies. *In Building technologies office*. <https://doi.org/10.1109/TAC.1963.1105511>
- Ramírez-Esquivel, O. Y., Mazón-Montijo, D. A., Montiel-González, Z., & Aguirre-Tostado, F. S. (2017). Deposition of Highly Crystalline Covellite Copper Sulphide Thin Films by SILAR. *Physica Status Solidi (A) Applications and Materials Science*, 214(12), 1–8. <https://doi.org/10.1002/pssa.201700500>
- Tipler, P., & Mosca, G. (2010). *Física para la ciencia y la tecnología* (6ta ed.). Reverteé, S. A.
- UNECE. (2020). *Promoting energy efficiency standards and technologies to enhance energy efficiency in buildings* (p. 63). p. 63. Geneva: United Nations.

Foto de portada de João Jesus

This entry was posted on Tuesday, January 11th, 2022 at 11:24 am and is filed under [Ciencias Exactas](#), [Zona Abierta](#)

You can follow any responses to this entry through the [Comments \(RSS\)](#) feed. Both comments and pings are currently closed.

