

¿Por qué podemos ver a través del vidrio, pero no del metal?

Juan Segurola · Todos los derechos reservados

QUE · Artículo 007 · Preguntas sencillas, respuestas profundas · Versión 0.1 ES

Una ventana y una lámina metálica contienen materia lo bastante compacta para oponer resistencia a una mano. Sin embargo, la luz visible puede atravesar la ventana, mientras que una lámina metálica suficientemente gruesa impide ver a través de ella. La diferencia no se explica diciendo que el vidrio es casi todo espacio vacío y el metal no. Ambos contienen componentes cargados que interactúan con los campos electromagnéticos. Lo que difiere es su respuesta a las frecuencias que intentamos ver.

La pregunta también necesita una matización. No todos los vidrios son transparentes en todas las longitudes de onda, y una capa metálica suficientemente fina puede transmitir algo de luz. La transparencia corresponde conjuntamente a un material, un intervalo de longitudes de onda, un espesor y una estructura. No es una etiqueta incondicional unida a un nombre químico.

1. Seguir la energía incidente

Cuando la luz llega a una muestra, parte de su energía puede reflejarse, parte transmitirse y parte absorberse [3]. Para una muestra pasiva en una medición óptica estacionaria, sin conversión significativa de longitudes de onda y contando todas las direcciones de salida, las fracciones satisfacen $R + T + A = 1$. Tanto la reflexión como la absorción pueden reducir la transmisión, pero dejan la energía en lugares diferentes.

Por tanto, un espejo opaco y una superficie negra opaca no tienen por qué comportarse de manera parecida. El primero devuelve gran parte de la luz incidente; la segunda absorbe gran parte de ella. Una medición que solo recoge el haz transmitido directo también puede confundir la dispersión fuera de ese haz con la absorción. Para separar los mecanismos, también deben considerarse la luz reflejada y la dispersada de forma difusa.

Estas distinciones convierten el título en una pregunta experimental. Especifica la longitud de onda y el espesor, y después pregunta qué vías retiran luz del haz que avanza. «No puede atravesarlo» describe el resultado, pero todavía no es su explicación física.

2. La materia transparente también responde

En una región transparente de un dieléctrico corriente, las cargas del material responden al campo luminoso sin disipar una fracción grande de su energía a lo largo del espesor de la muestra. Su respuesta electromagnética colectiva modifica la propagación. La refracción es prueba de interacción, no de que la luz haya evitado por completo el material. El tratamiento clásico de la respuesta conecta ese cambio con el movimiento de las cargas dependiente de la frecuencia [1].

Es engañoso imaginar la propagación por una ventana como una secuencia de absorciones corrientes seguidas de reemisiones espontáneas aleatorias. Esa imagen perdería las relaciones de fase y dirección responsables de la transmisión coherente y de la refracción. El campo óptico macroscópico incluye el campo incidente y la respuesta organizada del material.

En una descripción cuántica, la estructura electrónica restringe los procesos de absorción disponibles. Los vidrios transparentes comunes tienen una ventana de transmisión visible porque la absorción electrónica intensa no se distribuye uniformemente por ese intervalo.

Otros procesos de absorción adquieren importancia en otras regiones del espectro. La expresión «ventana de transmisión» es más exacta que «el vidrio no absorbe luz».

3. Por qué responde de otro modo un metal

Los metales tienen portadores de carga móviles que pueden responder intensamente a un campo óptico aplicado [2]. En una descripción sencilla de portadores libres, la respuesta dieléctrica depende de la frecuencia, la densidad de portadores y el amortiguamiento. En intervalos de frecuencia adecuados, la respuesta produce una reflexión intensa y campos que disminuyen rápidamente hacia el interior del material. Los metales reales también tienen transiciones electrónicas que van más allá de este modelo elemental de portadores.

Una expresión idealizada, omitiendo el amortiguamiento, es $\epsilon_r(\omega) = 1 - \omega_p^2/\omega^2$. Aquí, ϵ_r es la permitividad relativa y ω_p es la frecuencia de plasma del modelo. Por debajo de ω_p , la expresión es negativa. En ese límite sin pérdidas, el campo dentro de un material semiinfinito puede ser evanescente aunque la absorción sea cero. Por tanto, bloquear la transmisión no demuestra por sí solo que se absorba toda la energía incidente.

Añadir amortiguamiento permite la disipación. Incluir la respuesta de los electrones ligados y las transiciones entre bandas electrónicas es necesario para obtener un espectro óptico realista. La expresión sencilla identifica por qué importa la respuesta eléctrica; no debe utilizarse como un espectro numérico universal para todos los metales ni como explicación de todos los colores metálicos.

4. El espesor introduce una diferencia esencial

Si la amplitud del campo en un medio homogéneo absorbente disminuye como $\exp(-z/\delta)$, la intensidad disminuye como $\exp(-2z/\delta)$. Por tanto, la longitud de decaimiento de la amplitud δ es el doble de la correspondiente longitud de decaimiento de la intensidad. Citar una profundidad de penetración sin definir si describe el campo o la intensidad introduce una ambigüedad de un factor de dos.

Una expresión práctica para la intensidad es $I(z) = I(0) \exp(-\alpha z)$, donde α es un coeficiente de atenuación para el proceso y la longitud de onda especificados. Supongamos, solo como ilustración, que $\alpha = 10 \text{ m}^{-1}$ y el recorrido es 0,01 m. El factor de intensidad interna es $\exp(-0,1)$, aproximadamente 0,905. A 0,1 m es $\exp(-1)$, aproximadamente 0,368. Son datos hipotéticos, no valores medidos de un vidrio identificado.

Incluso ese cálculo omite las reflexiones en las interfaces y las posibles interferencias entre las superficies anterior y posterior. Los recubrimientos metálicos finos pueden transmitir parcialmente, y las multicapas ópticas aprovechan deliberadamente los efectos de las interfaces. La distinción familiar entre una ventana y una lámina metálica describe muestras macroscópicas comunes, no un teorema según el cual una categoría siempre transmite y la otra nunca lo hace.

5. Por qué algunos vidrios parecen turbios o coloreados

Un material puede tener una absorción baja y, aun así, impedir una visión nítida si dispersa intensamente la luz. Las variaciones del índice de refracción, los poros, las inclusiones o una superficie rugosa pueden desviar los rayos en muchas direcciones. Un vidrio esmerilado hace visible esta distinción: la luz puede entrar en la habitación sin conservar una imagen nítida del exterior.

El color introduce otra posibilidad. Si la transmisión varía a lo largo del espectro visible, la luz emergente puede tener un equilibrio espectral distinto. Las impurezas y los aditivos deliberados pueden modificar la absorción, mientras que las variaciones estructurales

pueden afectar a la dispersión. No puede inferirse el mecanismo microscópico a partir del nombre de un color solamente.

Una comparación significativa pregunta, pues, tanto cuánta energía sale como cómo se distribuye por ángulo y longitud de onda. «Transparente», «translúcido» y «opaco» describen resultados prácticos distintos, pero las mediciones subyacentes son continuas. Una muestra puede servir como ventana en una banda espectral y resultar inadecuada en otra.

6. Qué resuelve la explicación y qué no

Los espectros de transmisión y reflexión, las mediciones con varios espesores y las observaciones de dispersión difusa pueden restringir un modelo de respuesta del material. Si un coeficiente de absorción propuesto predice una dependencia incorrecta con el espesor, es necesario revisar el modelo o la descripción supuesta de la muestra. Un único ajuste satisfactorio puede seguir dejando ambigüedad entre distintas explicaciones microscópicas.

La distinción física bien establecida es la respuesta electromagnética dependiente de la frecuencia, combinada con la geometría y el espesor. Predecir el comportamiento de una muestra concreta requiere sus constantes ópticas, su estructura y las condiciones de su superficie. La respuesta electrónica de los materiales reales es más detallada que el modelo elemental de cargas ligadas o el límite de portadores libres, pero sus límites son instructivos, no contradictorios.

Podemos ver a través de un vidrio adecuado porque transmite una fracción útil de luz visible y conserva suficiente información direccional para formar una imagen. En cambio, los metales comunes gruesos reflejan y atenúan intensamente esa luz. Ninguno de los resultados se deduce de un simple recuento de espacios vacíos entre átomos, y ninguno explica por qué un sólido se resiste a ser atravesado por otro sólido. Esa es otra pregunta.

Lectura relacionada: QTC-003, sobre la solidez; IDE-020, sobre el concepto de partícula.

Referencias

- [1] Feynman, R. P.; Leighton, R. B.; Sands, M. The Feynman Lectures on Physics, vol. I, capítulo 31, The Origin of the Refractive Index. https://www.feynmanlectures.caltech.edu/I_31.html
- [2] Feynman, R. P.; Leighton, R. B.; Sands, M. The Feynman Lectures on Physics, vol. II, capítulo 32, Refractive Index of Dense Materials. https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_32.html
- [3] Feynman, R. P.; Leighton, R. B.; Sands, M. The Feynman Lectures on Physics, vol. II, capítulo 33, Reflection from Surfaces. https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_33.html