

LÁSER

Problema 1. El láser debe su nombre a las siglas “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”, es decir, está basado en la *emisión estimulada de radiación*. A diferencia de la emisión espontánea (que es mayoritaria en las fuentes de luz habituales; el sol, una bombilla...), este tipo de emisión requiere de un fotón, cuya longitud de onda y fase sean las mismas que las del fotón emitido en el proceso. Así se logra una luz monocromática (de un solo color) y muy coherente (hasta diferencias de posición y tiempo apreciables, todos los fotones tienen una fase definida).

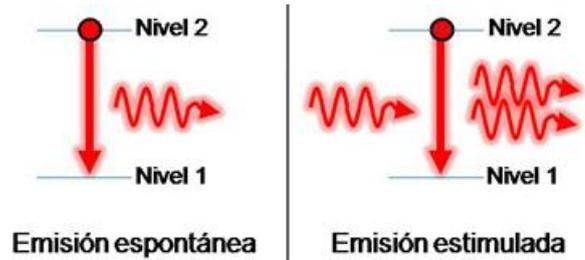


Imagen de <http://www.cipu.es/divulgacion/bits/queson-la-emision-espontanea-la-emision-estimulada-y-la-inversion-de-poblacion>.

a) El láser más común es el láser de HeNe, cuyo medio activo consiste en un 85% de helio y un 15% de neón en un tubo. Este láser emite luz roja, con longitud de onda de 632.8 nm y cuyo tiempo de transición entre niveles es $2 \cdot 10^{-8} \text{ s}$. Calculad la dispersión de frecuencias debida a este efecto de dicha emisión de luz (llamada dispersión natural).

b) Se dice que la luz emitida por un láser es monocromática. Experimentalmente, esto significa que dicha luz tiene una dispersión despreciable en frecuencias en torno a la frecuencia de emisión central. A partir del resultado anterior, obtened para este láser dicha dispersión ($\Delta\nu/\nu$) y ved en qué grado tal afirmación es correcta.

Respuesta:

a) Si no existiera incertidumbre en las magnitudes, la energía y la frecuencia de los fotones emitidos por el láser tendrían unos valores exactos. Esto no es así porque se ha de cumplir el principio de incertidumbre de Heisenberg:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$$

Esto implica una dispersión de energías y, por tanto, de frecuencias, ya que la energía de cada fotón emitido es $E = h\nu$ ($\Delta E = h\Delta\nu$).

Teniendo en cuenta que el tiempo de transición entre niveles es igual a la incertidumbre mínima de medida en el tiempo, la dispersión máxima de frecuencias resulta (se obtiene asumiendo que se cumple la igualdad en el principio de incertidumbre):

$$\Delta\nu = \frac{1}{2 \cdot 2\pi \cdot \Delta t} = \frac{1}{2 \cdot 2\pi \cdot 2 \cdot 10^{-8}} = 8 \cdot 10^6 \text{ Hz}$$

b) En el vacío, la relación entre la frecuencia y la longitud de onda de la luz es:

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{632.8 \cdot 10^{-9}} = 4.7 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Y al comparar este valor con el del apartado a) se obtiene:

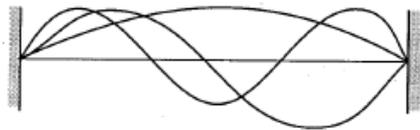
$$\frac{\Delta\nu}{\nu} \approx 10^{-8}$$

Es decir, la dispersión en frecuencias es 8 órdenes de magnitud inferior a la frecuencia misma del láser. Por tanto, tiene sentido considerar el haz del láser como monocromático, con una luz emitida cuya frecuencia siempre es de $4.7 \cdot 10^{14}$ Hz.

Ampliación:

En los láseres de gas como el de HeNe, hay una incertidumbre 1-2 órdenes de magnitud mayor que la calculada, basada en el efecto *Doppler*. Se debe al movimiento relativo de los átomos de gas respecto al receptor. Esta incertidumbre sigue siendo despreciable con respecto a la frecuencia central (se obtendría $\Delta\nu/\nu = 10^{-6}$).

Problema 2. Una parte importante del láser es la cavidad óptica, basada en dos espejos de alta reflectancia donde la luz se amplifica tras un gran número de reflexiones entre los mismos. En el interior



de la cavidad se encuentra el material activo de donde proviene la emisión de luz, que puede estar en estado gaseoso (ej. gas de HeNe), líquido o sólido. Como se observa en la figura adjunta, las ondas que se confinan en la cavidad se pueden ver como ondas estacionarias y, por tanto, se tiene un número discreto de frecuencias permitidas dentro de la cavidad.

estacionarias y, por tanto, se tiene un número discreto de frecuencias permitidas dentro de la cavidad.

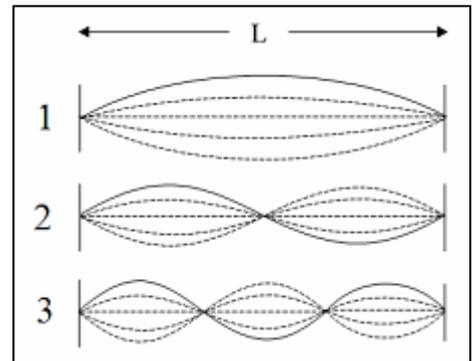
- a) Escribid la expresión general de la longitud de onda de la luz emitida por la cavidad en función de la longitud de dicha cavidad óptica, L (que es igual a la diferencia de posición entre los dos espejos).
- b) La longitud típica de una cavidad láser de HeNe ($\lambda = 632.8$ nm) es de 30 cm. ¿En qué modo está operando el láser?
- c) Si el medio activo es un sólido, como por ejemplo un microhilo de longitud L, y la amplificación se produce entre sus dos extremos (que actúan como espejos), ¿qué parámetro habría que introducir en la ecuación del apartado a) y cómo crees que quedaría la expresión?

Respuesta:

a) El modo fundamental tiene una longitud de onda igual a 2 veces la longitud entre los espejos, es decir, $\lambda = 2L$. El segundo modo tiene $\lambda = L$ y el tercero $\lambda = 2L/3$. Por tanto, la expresión general que da los modos de resonancia del láser en la cavidad es:

$$\lambda = 2L/m \quad (m = 1, 2, \dots \text{ indica el modo de resonancia})$$

Esta expresión es análoga a la de los modos de vibración una cuerda sujeta por ambos extremos (dibujo adjunto).



b) El modo al que está operando el láser es:

$$m = 2L/\lambda = 948167$$

Este resultado dice que el láser opera en una frecuencia que es casi un millón de veces mayor a la frecuencia del modo fundamental de la cavidad.

[Nota: A partir de $\Delta\lambda/\lambda = 10^{-6}$ (dispersión debida al efecto Doppler) y de una incertidumbre de la distancia entre espejos de $\Delta L/L = 10^{-6}$ (debido a la planitud de las superficies especulares y las vibraciones térmicas) se obtiene $\Delta m/m = 2 \cdot 10^{-6} \rightarrow \Delta m \approx 2$. Este sencillo cálculo nos muestra la dificultad física de obtener un láser de un único modo, llamado láser monomodo].

De hecho, la frecuencia a la que opera el láser es:

$$v_{\text{LASER}} = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{632.8 \cdot 10^{-9}} = 4.7 \cdot 10^{14} \text{ Hz.}$$

Y, como la expresión de los modos de resonancia es:

$$v_m = \frac{c \cdot m}{2 \cdot L}$$

La frecuencia del modo fundamental de la cavidad ($m=1$) es:

$$v_{\text{fundamental}} = \frac{c \cdot 1}{2 \cdot L} = 3 \cdot \frac{10^8 \cdot 1}{2 \cdot 0.3} = 5 \cdot 10^8 \text{ Hz}$$

Cuyo cociente es de nuevo 10^6 .

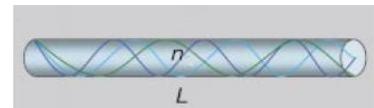
c) Si el medio activo es un sólido, en la cavidad, la luz, en vez de viajar por un gas, lo hace un material, que tendrá un índice de refracción distinto a 1. Por tanto, el parámetro que se tiene que introducir es el índice de refracción del material, n .

Los modos de resonancia en el material tendrán la misma expresión (la deducción es geométrica entre λ y L) pero, cuando el láser emite la luz, es decir, al pasar al aire, su longitud de onda cambiará. De óptica básica, sabemos que en un medio material transparente, la luz se propaga, respecto al aire, con la misma frecuencia pero con menor velocidad de fase, y por tanto menor longitud de onda:

$$\lambda = \lambda_0 / n$$

Donde n es el índice de refracción del material ($n > 1$), λ_0 es la longitud de onda en el aire y λ la longitud de onda en el medio. Por tanto, la expresión para la luz emitida por el láser será:

$$\lambda_m = \lambda_{m,\text{material}} \cdot n = \frac{2nL}{m}$$



Por ejemplo, Si tenemos un material transparente de índice de refracción de 1.5 en el cual está resonando luz de longitud de onda de 400 nm, el láser emitirá luz de $\lambda=600$ nm. Es importante recordar que la frecuencia de la luz no cambia y por tanto tampoco su color visto por nuestros ojos, que será naranja (pues, en el aire, la luz de $\lambda=600$ nm corresponde a un color naranja) tanto dentro como fuera del material.

Los datos y el apartado b) están tomados de: http://www.uobabylon.edu.iq/eprints/publication_2_14877_1775.pdf

La imagen del apartado c) está tomada de [1].

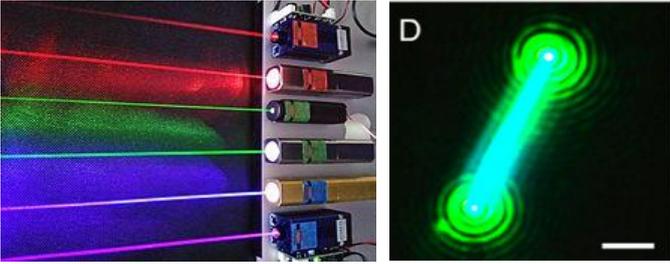
Un sencillo experimento para comprobar el cambio en longitud de onda de la luz en un medio transparente por un factor $1/n$ se muestra en el siguiente vínculo: <https://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.13827>

Ampliación:

Los modos de ondas estacionarias presentes en una cavidad se denominan modos longitudinales, pues, en general, su dirección de propagación es paralela al eje de la misma. En un láser, no tenemos luz de los infinitos modos posibles pues el medio activo (el gas, líquido o sólido) no emite a todas las frecuencias. Por ejemplo, el láser de HeNe se basa en una emisión entre los niveles 5s y 3p del neón (emisión excitada por la colisión con los átomos de helio). La cavidad se debe diseñar con una geometría (en particular, con una longitud) precisa y adecuada para que esa emisión coincida con uno de sus modos de resonancia, y con ello la luz sea amplificada. Es decir, en un láser, la frecuencia de la luz generada por el medio activo coincide con uno de los modos longitudinales permitidos en su cavidad.

Los láseres cumplen un doble papel en la nanotecnología y en la ciencia de materiales. En primer lugar, se utilizan en varios dispositivos experimentales; ya sea para desarrollar materiales de alta calidad (por

Deposición Pulsada por Láser) o como fuentes de luminiscencia de los propios materiales (luz emitida por los materiales tras un estímulo, en este caso de luz láser, cuyo análisis permite obtener propiedades fundamentales y aplicaciones de los mismos).



En segundo lugar, se han desarrollado y se sigue investigando en los láseres cuyo medio activo en las cavidades ópticas es un sólido transparente a la longitud de onda resonante deseada, como los que se muestran en la imagen más a la izquierda (https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_diode). Muchos de ellos están basados en materiales semiconductores

dopados con tierras raras, cuya emisión de luz no se ve afectada por las vibraciones térmicas. Actualmente, se está investigando en el uso de micro- y nanohilos como medios activos. En ocasiones, se logra confinar la luz y generar luz láser. Estos nanohilos tienen como ventaja más inmediata la reducción del tamaño de la cavidad resonante. Un ejemplo sería el nanohilo del ejercicio 2c), que bien podría representar la imagen más a la derecha, cuya referencia es el artículo de Eaton S.W et al [2].

REFERENCIAS

[1] Duan X., Huang Y., Agarwal R., Lieber C.M., “Single-nanowire electrically driven lasers”, *Nature*. Jan 16; 421, 241-245 (2003).

[2] S.W. Eaton, M. Lai, N.A. Gibson, A.B. Wong, L. Doua, J. Ma, L. Wang, S. R. Leone, P. Yang “Lasing in robust cesium lead halide perovskite nanowires”, *Nat. Acad. Sci.* 113 (2016).

Manuel Alonso Orts

[Problemas de Física de Materiales y de Física Biomédica para Bachillerato](#)