

## Láser de helio-neón: prácticas de laboratorio sobre láser e interacción luz-materia

### Helium-Neon laser: laboratory experiments on laser and light-matter interaction

Cristian Lavieja, Sebastián Jarabo<sup>(\*,S)</sup>

Departamento de Física Aplicada, Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza, C/ Pedro Cerbuna 12, 50.009 Zaragoza, Spain

<sup>(\*)</sup> Email: sjarabo@unizar.es

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Recibido / Received: 01/02/2010. Revisado / Revised: 23/03/2011. Aceptado / Accepted: 24/03/2011

#### RESUMEN:

Se expone y analiza un conjunto de prácticas docentes de laboratorio que ilustran conceptos importantes sobre láser e interacción luz-materia (emisión espontánea, amplificación óptica, alineamiento de la cavidad láser, modos transversales y modos longitudinales). En todas ellas se emplean láseres y tubos de helio-neón de bajo costo.

**Palabras clave:** Prácticas de Óptica, Educación en Óptica, Láser, Amplificación Óptica, Resonadores, Características de Haz Láser, Emisión Espontánea.

#### ABSTRACT:

A group of laboratory experiments on laser and interaction of light with matter (spontaneous emission, optical amplification, laser cavity alignment, transverse modes, and longitudinal modes) are presented and analysed. Low-cost Helium-Neon lasers and tubes are used in these experiments.

**Keywords:** Optics Experiments, Optics Education, Laser, Optical Amplification, Resonators, Beam Characteristics, Spontaneous Emission.

#### REFERENCES AND LINKS

- [1]. O. Svelto, *Principles of Lasers*, Plenum Press, New York (1998).
- [2]. W. T. Silfvast, *Laser Fundamentals*, Cambridge University Press (2004).
- [3]. A. E. Siegman, *Lasers*, University Science Books (1986).
- [4]. Laboratory Experiments, Physics, LEP 2.6.04, 2.6.07, 2.6.08 y 2.6.09, Phywe series of publications.
- [5]. Casix, [www.casix.com](http://www.casix.com).
- [6]. Roithner Lasertechnik, <http://www.roithner-laser.com>.
- [7]. S. Jarabo, J. M. Álvarez, "Aprendiendo física del láser con experimentos", en *Algunas Cuestiones de Ciencia. Libro Homenaje al Profesor Manuel Quintanilla*, Prensas Universitarias de Zaragoza (2007).
- [8]. Sam Goldwasser, <http://www.repairfaq.org/sam>.
- [9]. M. Jackson, D. Bauen, J. E. Hasbun, "Investigation of laser fundamentals using a helium-neon laser", *Eur. J. Phys.* **22**, 211-218 (2001).
- [10]. C. Hopper, A. Sieradzan, "Yellow He-Ne going red: A one-minute optics demonstration", *Am. J. Phys.* **76**, 596-598 (2008).
- [11]. [http://www.unizar.es/departamentos/fisica\\_aplicada/tads/TAD\\_Cristian%20Lavieja%20Belanche.pdf](http://www.unizar.es/departamentos/fisica_aplicada/tads/TAD_Cristian%20Lavieja%20Belanche.pdf).
- [12]. A. Javan, D. R. Herriott, W. R. Bennett, "Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a He-Ne mixture", *Phys. Rev. Lett.* **6**, 106-110 (1961).

- [13] J. L. Rapier, H. H. Heimple, A. L. Schawlow, "Spontaneous emission from a Helium-Neon laser as a convenient wavelength standard", *Am. J. Phys.* **35**, 890-891 (1967).
- [14] National Institute of Standards and Technology, [www.nist.gov/physlab/data/asd.cfm](http://www.nist.gov/physlab/data/asd.cfm).
- [15] "Helium Neon Laser", Laboratory Experiments, Physics, LEP 2.6.07, Phywe series of publications.
- [16] K. L. Vander Sluis, G. K. Werner, P. M. Griffin, H. W. Morgan, O. B. Rudolph, P. A. Staats, "A simplified construction of a Helium-Neon visible laser", *Am. J. Phys.* **33**, 225-240 (1965).
- [17] T. Sakurai, T. Ohta, T. Ogawa, "Unsaturated gain and output power of a 6328 Å He-Ne gas laser", *IEEE J. Quant. Electron.* **QE4**, 65-70 (1968).
- [18] S. Spoor, I. D. Latimer, "An accurate determination of the radial-distribution of gain at 633 nm in small bore Helium-Neon discharges", *J. Phys. D - Appl. Phys.* **17**, 1607-1615 (1984).
- [19] L. E. S. Mathias, N. H. Rock, "A Helium-Neon laser amplifier", *Appl. Opt.* **4**, 133-135 (1965).
- [20] G. Mas, H. Blancher, J. Roig, "Light-intensity of fundamental TEM00 mode of a He-Ne gas-laser without Brewster windows - Achievement of a polarized rectilinear laser-beam of stable intensity", *Appl. Opt.* **13**, 2771-2773 (1974).
- [21] R. Balhorn, F. Lebowsky, H. Kunzmann, "Frequency stabilization of internal-mirror Helium-Neon lasers", *Appl. Opt.* **11**, 742-744 (1972).
- [22] G. A. Woolsey, M. Y. Sulaiman, M. Mokhsin, "Correlation of changes in laser tube temperature, cavity length, and beam polarization for an internal-mirror Helium-Neon laser", *Am. J. Phys.* **50**, 936-940 (1982).
- [23] R. Feinberg, "Observing the transverse-modes of an optical-resonator", *Am. J. Phys.* **50**, 90-90 (1982).
- [24] L. W. Davis, G. Patsakos, "A spherical mirror Fabry-Pérot-interferometer for microwave demonstrations", *Am. J. Phys.* **55**, 917-920 (1987).
- [25] P. Nachman, A. C. Bernstein, "Scanning, spherical-mirror Fabry-Pérot interferometer: An upper-division optics laboratory experiment", *Am. J. Phys.* **65**, 202-213 (1997).
- [26] M. Hercher, "Spherical mirror Fabry-Pérot interferometer", *Appl. Opt.* **7**, 951-966 (1968).
- [27] E. K. Hasle, "Polarization properties of He-Ne-lasers", *Opt. Commun.* **31**, 206-210 (1979).
- [28] P. W. Smith, "Stabilized single-frequency output from a long laser cavity", *IEEE J. Quant. Electron.* **QE1**, 343-348 (1965).
- [29] D. M. Kane, "The use of a nearly confocal interferometer for the study of transverse-modes of a cavity", *Am. J. Phys.* **59**, 235-239 (1991).

## 1. Introducción

La interacción luz-materia y el láser son dos temas bien establecidos en los planes de estudio de titulaciones científico-técnicas, bien sea a nivel de grado o de posgrado. De hecho, se encuentran publicados bastantes libros de texto [1-3] que facilitan enormemente la labor del profesorado a la hora de organizar y preparar sus clases. Sin embargo, la preparación y el desarrollo de prácticas de laboratorio sobre estos temas no resulta tan accesible debido a que los montajes experimentales son relativamente complicados de diseñar con un presupuesto bajo. Estos montajes se encarecen porque suele ser necesario emplear componentes ópticos con una calidad relativamente alta para conseguir que funcionen correctamente y que permitan ilustrar los efectos a estudiar con la claridad necesaria en una práctica docente. En bastantes

ocasiones, este problema puede solucionarse mediante ensayos y modificaciones del montaje, aunque lleve asociado inevitablemente un aumento considerable del tiempo de preparación de la práctica. Por ejemplo, incluir un elemento óptico dentro de una cavidad láser para ver un determinado efecto puede elevar las pérdidas de la cavidad lo suficiente para suprimir la acción láser y arruinar el experimento. Habría entonces que ensayar varias posibles soluciones: aumentar el bombeo del medio activo, cambiar el medio activo por otro que nos proporcione mayor ganancia o sustituir uno de los espejos por otro con mayor factor de reflexión. Sin embargo, dependiendo del tipo de láser, no todas pueden realizarse de forma fácil y económica. Por ejemplo, si el láser es de helio-neón, la más sencilla y barata es la tercera, pero aún así conlleva un gasto bastante

elevado y, por supuesto, podría derivar en una disminución de la potencia de salida del láser. Por supuesto, siempre que se disponga de un presupuesto holgado (a partir de 10000 euros), se puede adquirir todo el material necesario a empresas especializadas en la fabricación de montajes experimentales para docencia [4].

Afortunadamente, la situación ha mejorado en los últimos años. Por una parte, es posible adquirir material para estas prácticas a precios bastante más asequibles. Por ejemplo, el importe de un cristal de Nd:YAG (con o sin cristal doblador de frecuencia) con sus caras ya espejadas [5] y un láser de bombeo [6] no tiene por qué superar los 800 euros (ó 1000 euros si incluimos unas gafas de protección) y, aproximadamente, éste es el precio del típico láser de helio-neón de baja potencia que suele emplearse en cualquier laboratorio de prácticas. Aunque el montaje pueda parecer muy simple, si lo completamos con un conjunto de filtros neutros a la salida del láser de bombeo para variar la potencia de bombeo que llega al cristal, un filtro después del cristal de Nd:YAG para eliminar el bombeo residual y un fotodetector, podemos determinar la potencia de bombeo umbral y la eficiencia [1-3] de dicho láser. Y si en lugar de los filtros neutros colocásemos un modulador mecánico (*chopper*) podríamos analizar experimentalmente las oscilaciones de relajación [1-3] del láser de Nd:YAG. Estos montajes también pueden aprovecharse para prácticas sobre interacción luz-materia, como por ejemplo, medida del espectro de fluorescencia y del tiempo de vida media [7].

Por otra parte, la proliferación de páginas en Internet abre la posibilidad de encontrar material de segunda mano e incluso de desguace de algunos tipos de láser [8]. Así, es posible conseguir tubos láser de helio-neón acabados en ángulo de Brewster, una fuente de alimentación apropiada y dos espejos (para oscilación en 632.8 nm) por menos de 300 euros. Lógicamente, es necesario añadir soportes y varios elementos optomecánicos para completar el montaje experimental. Además, la variedad de material de desguace puede ser más amplia si en el departamento donde se imparte la docencia hay grupos de investigación que pueden proporcionar láseres en desuso.

Como ya se ha comentado, aunque podamos disponer de material adecuado a bajo precio, siempre habrá que estar dispuesto a invertir bastante tiempo en llevar a cabo el montaje del material, las pruebas de laboratorio y ensayar las correcciones necesarias hasta completar la práctica de laboratorio. Por todo ello resulta muy interesante disponer de información de prácticas de laboratorio realizadas por otros profesores [7, 9-10], ya que nos pone en la pista de qué montajes pueden llegar a buen puerto, lo que se traduce en un ahorro de tiempo importante y, sobre todo, constituyen una garantía de éxito en la tarea.

Así pues, este trabajo intenta mostrar algunas prácticas docentes viables que pueden realizarse sobre el láser de helio-neón de manera que pueda servir a otros profesores que necesiten desarrollar prácticas sobre láser e interacción luz-materia. Hay que resaltar que su punto de partida es un trabajo académicamente dirigido [11] del que se presentan aquí sus resultados más relevantes. Además, aunque nos centramos bastante en prácticas para láser, es necesario comentar que también se podrían extraer prácticas sobre técnicas experimentales: identificación de líneas espectrales, espectroscopia de baja resolución con monocromador, espectroscopia de alta resolución con interferómetro de Fabry-Pérot, etc.

Entre todos los tipos de láser existentes, se eligió el de helio-neón porque permite realizar un alto número de prácticas docentes sin necesidad de grandes equipamientos y porque resulta fácil encontrar material de laboratorio adecuado debido a su implantación casi generalizada a lo largo de sus 50 años de historia [12].

Por último, se debe destacar que el material básico para la realización del trabajo académicamente dirigido han sido tubos y espejos procedentes del desguace de láseres comerciales. Concretamente, se emplearon dos láseres, 1) Spectra Physics Stability modelo 120 (ambos espejos están separados del tubo, el cual termina en ventana de Brewster en sus dos extremos), en adelante, SP120B; 2) Melles Griot modelo 05-LHB-570 (uno de los espejos sella uno de los extremos del tubo, el otro espejo está

separado y ese extremo del tubo termina en ventana de Brewster), en adelante, MG570. Además, en parte del trabajo también se utilizaron tres láseres comerciales sin desguazar: 1) Spectra Physics Stability modelo 120, en adelante, SP120; 2) Spectra Physics modelo 155, en adelante, SP155; 3) Melles Griot modelo 05-LHR-911, en adelante, MG911. Estos dos últimos láseres tienen ambos extremos del tubo sellados por sendos espejos.

## 2. Medidas de espectros de emisión espontánea

Esta primera práctica consiste simplemente en la medida del espectro de la emisión espontánea emitida por los átomos de neón contenidos en el tubo de descarga. Este tipo de práctica se realiza habitualmente empleando lámparas espectrales, las cuales suelen proporcionar un número de líneas bastante bajo. Sin embargo, empleando tubos de láseres de helio-neón, disponemos de una fuente barata (siempre que arranque, se puede aprovechar el tubo de algún láser viejo que ya no funciona como láser) que nos proporciona un gran número de líneas espectrales, como veremos. Por tanto, es una fuente muy adecuada para que el alumno profundice sobre las técnicas experimentales de espectroscopia con monocromador y de identificación de líneas espectrales (transiciones ópticas). Sorprende que, aunque suelen ser medidas preliminares de trabajos docentes sobre láser, apenas haya bibliografía sobre este tipo de medidas [10, 13].

En la Fig. 1 se muestra el montaje experimental empleado para la medida del espectro de emisión espontánea emitida en dirección transversal al tubo de descarga (eje del resonador). Lógicamente, girando el tubo y enfrentado una de las ventanas de Brewster a la rendija de entrada del monocromador, el mismo montaje sirve para medir la emisión espontánea longitudinal (con esta orientación le llega más potencia al detector). El tubo de descarga es el del láser SP120B. El monocromador empleado puede trabajar con una red de difracción para visible (1200 líneas/mm, resolución hasta 1 nm, máxima respuesta en 500 nm) o con una red de difracción para infrarrojo cercano (600

líneas/mm, resolución hasta 2 nm, máxima respuesta en 1000 nm). El fotodiodo es de silicio (FDS100, de Thorlabs), lo que limita el rango espectral de medida hasta 1200 nm, aproximadamente. El montaje podría mejorarse incluyendo filtros para ajustarnos al intervalo espectral libre del monocromador y eliminar segundos órdenes de difracción. Esta limitación se resuelve tras identificar las líneas espectrales utilizando la base de datos del National Institute of Standards and Technology (N.I.S.T.) [14] y verificar qué picos del espectro medido corresponden a segundos órdenes de difracción.

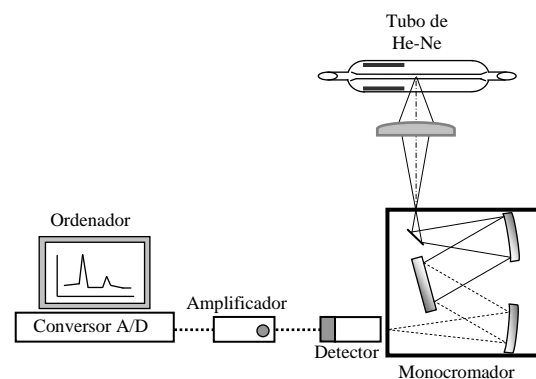


Fig. 1: Montaje experimental para la medida de espectros de emisión espontánea emitida en dirección transversal al tubo de descarga (eje del resonador).

A modo de ejemplo del alto número de líneas espectrales que se detectan, en la Fig. 2 se muestra un espectro de la emisión espontánea emitida en dirección longitudinal y analizada con la red de difracción para visible. En la memoria del trabajo académicamente dirigido [11] se recoge una muestra más amplia de espectros medidos desde 450 nm hasta 1200 nm empleando ambas redes de difracción. Aunque se identificaron líneas espectrales del neón a lo largo de todo el rango espectral medido, en esta figura se señalan por su especial relevancia algunas de las líneas espectrales identificadas: tres corresponden a transiciones empleadas en láseres comerciales (593.9 nm, 611.8 nm y 632.8 nm) y dos corresponden a transiciones con amplificación [15] (635.2 nm y 640.1 nm), aunque no hayan sido empleadas en láseres comerciales. Centrándonos en líneas espectrales empleadas en láseres comerciales, también se identificaron las líneas de 543.4 nm, 1152.3 nm y

1152.5 nm (realmente, se detectó un pico de potencia en 1152 nm correspondiente a estas dos últimas líneas, que no se resolvieron debido a la resolución disponible). Sin embargo, no se pudo detectar la línea espectral de 604.6 nm, probablemente porque su emisión en nuestro tubo es muy poco intensa. Por supuesto, tampoco se detectaron las de 1523 nm y 3392 nm, debido a la respuesta espectral del montaje experimental.

Como se aprecia claramente en la Fig. 2, la línea de 632.8 nm no es en la que se emite mayor potencia de emisión espontánea, lo que en principio puede llegar a sorprender ya que, debido al uso tan extendido del láser de helio-neón emitiendo en 632.8 nm, se está acostumbrado a asociar el neón con esta línea espectral. Hay líneas donde se emite más potencia de emisión espontánea, pero tienen un coeficiente de ganancia bajo (de hecho, la línea de 632.8 nm es la que presenta un coeficiente de ganancia más alto [15]), e incluso negativo (es decir, no ofrecen amplificación óptica).

En este tipo de medidas el principal problema experimental suele ser el calibrado correcto de la posición de la red de difracción del monocromador. Si en el propio espectro existe una línea que sirve de referencia, el problema se simplifica y no es necesario recurrir a una

segunda fuente para calibrar la posición de la red. En este tipo de fuentes no suele ser así porque el espectro de emisión espontánea depende de la geometría del tubo de descarga, de las presiones de helio y de neón y de la intensidad de alimentación. También hay que tener en cuenta que, antes de comparar la potencia en dos líneas espectrales bastante separadas habría que tener en cuenta las respuestas espectrales del monocromador y del fotodetector. Como veremos más adelante, la potencia detectada en cada línea también depende de la orientación del tubo. Además, hay muchas líneas espectrales muy cercanas entre sí y ninguna tiene algún rasgo característico que la distinga del resto.

Este problema se soluciona de forma sencilla utilizando un filtro espectral para alguna de las líneas del helio-neón. Para ello se utilizó un filtro con una anchura espectral a media altura de 1 nm y centrado en 632.8 nm. Una vez corregida la posición de la red de difracción lo mejor posible, se mide el espectro emitido por el tubo y filtrado, determinando el desplazamiento entre el espectro medido y el espectro real (suele ser de algunas décimas de nm). Con este desplazamiento se corrigen los espectros medidos para la emisión espontánea del tubo de descarga.

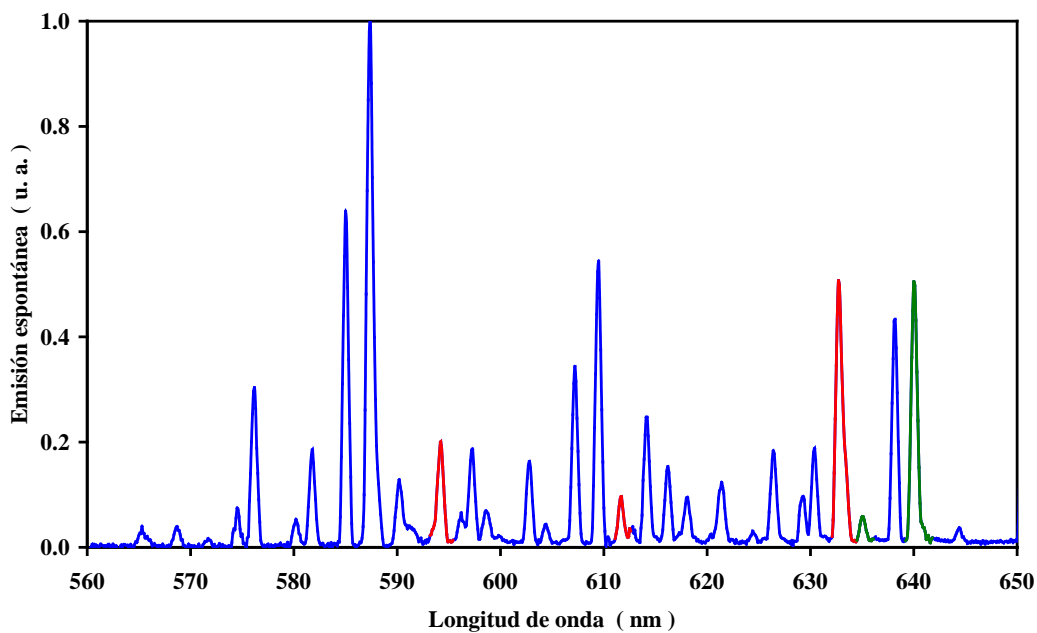


Fig. 2: Espectro de emisión espontánea longitudinal obtenido con la red de difracción para visible. Se han dibujado en rojo tres líneas espectrales empleadas en láseres comerciales (593.9 nm, 611.8 nm y 632.8) y, en verde, dos para las que al menos puede conseguirse amplificación óptica (635.2 nm y 640.1 nm).

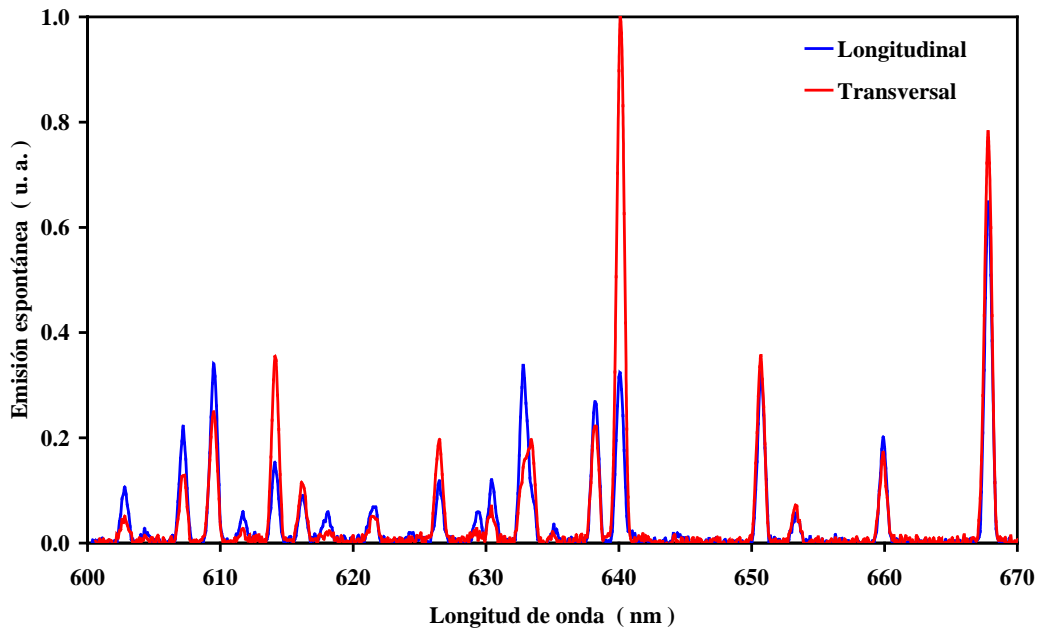


Fig. 3: Comparación de los espectros de emisión espontánea longitudinal y transversal obtenidos con la red de difracción para visible. Se aprecia claramente cómo la potencia en la línea de 640.1 nm es fuertemente atenuada al atravesar el tubo de descarga.

Una demostración interesante consiste en comparar cómo cambian los espectros de emisión espontánea longitudinal y transversal. En la Fig. 3 se muestran ambos espectros, longitudinal y transversal, para la región espectral desde 600 nm hasta 670 nm. Se puede apreciar cómo la distribución de potencia entre las líneas espectrales cambia fuertemente dependiendo de si se mide en dirección transversal o longitudinal. Esto es debido a que, cuando se mide la emisión en dirección longitudinal, la luz atraviesa el tubo de descarga antes de ser analizada. La mezcla de helio y neón es un medio absorbente para algunas longitudes de onda, pero es un medio amplificador para otras, ya que el tubo de descarga está bombeado. Por tanto, comparando ambos espectros puede extraerse información cualitativa acerca de qué longitudes de onda pueden ser mejores para conseguir oscilación láser y justificar por qué es más difícil conseguirlo en otras. Así, por ejemplo (véase la Fig. 3), para el tubo empleado, la transición de 640.1 nm no sería adecuada para conseguir oscilación láser, ya que resulta fuertemente atenuada al atravesar el tubo. No obstante, en otras condiciones de trabajo esta línea sí ofrece amplificación [15].

Por último, si la fuente nos permite modificar (mediante algún potenciómetro accesible) la intensidad eléctrica con la que alimentamos el tubo, también puede hacerse alguna demostración de cómo varía la potencia del espectro de emisión espontánea transversal en función de la intensidad de bombeo [16].

### 3. Medidas de amplificación óptica

Es interesante demostrar experimentalmente que la mezcla de helio y neón bombeada eléctricamente presenta amplificación óptica en 632.8 nm y, por tanto, es un medio activo con el que puede montarse un láser en dicha longitud de onda. Sin embargo, es una práctica docente poco común en la bibliografía. En las Figs. 4 y 5 se representan esquemáticamente los montajes experimentales empleados para medir el factor de ganancia en 632.8 nm para los dos tubos disponibles (SP120B y MG570), el cual se determinó mediante dos métodos: el de amplificación directa (Fig. 4) y el de amplificación por doble paso (Fig. 5). Son similares a los habituales en medidas de amplificación óptica [17-18], aunque han sido simplificados y adaptados a nuestro problema particular. El láser de He-Ne empleado como

láser de referencia y como láser de alineamiento emite en 632.8 nm.

Como el láser de helio-neón en 632.8 nm puede asociarse prácticamente a un sistema de cuatro niveles ideal y considerar despreciable la absorción desde el nivel de energía inferior de la transición láser, es posible determinar la ganancia por paso midiendo la respuesta del detector en cuatro situaciones experimentales distintas: 1) láser de referencia encendido y tubo bombeado (se detecta la potencia amplificada más la potencia de emisión espontánea), 2) láser de referencia encendido y tubo sin bombear (se detecta la potencia sin amplificar), 3) láser de referencia apagado y tubo bombeado (se detecta la potencia de emisión espontánea), y 4) láser de referencia apagado y tubo sin bombear (medida de la tensión de fondo). Además, también es necesario que la intensidad óptica del haz láser de referencia sea mucho menor que la intensidad de saturación del medio activo para que no modifique la potencia de emisión espontánea. En laboratorios docentes esta condición suele cumplirse siempre, ya que dicha intensidad de saturación puede estimarse en 350 mW/mm<sup>2</sup> a partir de valores típicos [2] de la sección eficaz de emisión estimulada y del tiempo de vida media de la transición láser del helio-neón.

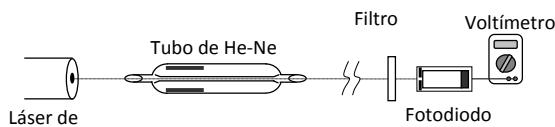


Fig. 4: Montaje experimental para medir la ganancia mediante el método de amplificación directa

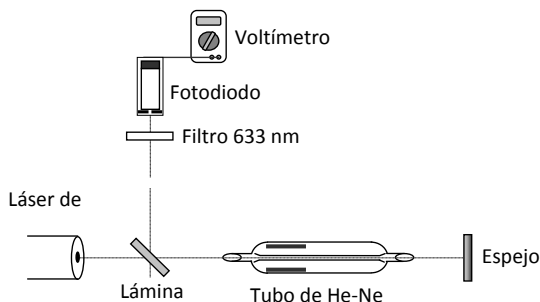


Fig. 5: Montaje experimental para medir la ganancia mediante el método de amplificación por doble paso.

Por otra parte, para que las medidas de ganancia sean precisas, conviene que la potencia de emisión espontánea que llega al detector sea mucho menor que la potencia del haz láser. Aunque esta condición puede satisfacerse diafragmando el detector y alejándolo del tubo, se mejora colocando un filtro espectral (transmisión máxima en 632.8 nm, anchura espectral a media altura 3 nm) delante del detector. Aunque también hay emisión espontánea procedente del láser de referencia, su influencia va a ser siempre muchísimo menor que la que proviene del tubo.

En general, el montaje de amplificación por doble paso presenta la ventaja de que aumenta el cociente entre la potencia amplificada y la potencia sin amplificar, lo que permite medir con más precisión la ganancia por paso, sobre todo si ésta es muy cercana a la unidad. Además, en el caso de tubos con uno de sus extremos sellado por un espejo (como el MG570), la potencia que llega al detector es mucho mayor que en el método directo porque los espejos suelen tener un factor de reflexión en torno al 98 ó 99%, mientras que tras los dos pasos por la lámina semirreflejante se transmite un 25% de la potencia.

Con ambos métodos de medida se encontraron resultados similares y estadísticamente compatibles. Para los tubos SP120B y MG570, el valor medio de la ganancia por paso resultó ser 1.062 (amplificación del 6.2%) y 1.023 (amplificación del 2.3%), respectivamente, con un error estadístico relativo del 0.2%. Hay que hacer notar que, para el porcentaje de amplificación, este error se eleva hasta el 3% y el 9%, respectivamente. Estos valores de ganancia están de acuerdo con los valores típicos que se encuentran en la bibliografía [2,15,17-19].

Finalmente, aunque estas medidas son relativamente sencillas, conviene hacer algunas observaciones sobre qué tipo de fuente resulta adecuada para su realización. En primer lugar, como los tubos que estamos caracterizando tienen ventanas de Brewster, es conveniente emplear un láser de referencia que emita siempre en el mismo estado de polarización. Empleando un láser “despolarizado” (por ejemplo, el MG911), el estado de polarización de

la luz emitida presenta una variación temporal periódica, por lo que hay un cambio periódico en el factor de transmisión de las ventanas de Brewster. Este efecto se comprobó midiendo con un detector la potencia emitida por el láser después de atravesar un polarizador lineal. La tensión detectada varía fuertemente (llega a cero) con un periodo de 42 segundos. La variación no es un coseno cuadrado, es decir, hay procesos más complicados que el simple giro de la polarización [20-22]. No obstante, la ganancia puede medirse de forma correcta siempre que se promedie durante tiempos suficientemente largos.

Por otra parte, como la mezcla de helio-neón amplifica en un rango espectral muy estrecho (1.5 GHz, 2 pm) en torno a la longitud de onda de 632.8 nm, no debe emplearse una fuente de espectro ancho (un LED, por ejemplo), ya que sólo tendríamos amplificación en un intervalo espectral mucho más estrecho que el espectro de la fuente (3 ó 4 órdenes de magnitud), por lo que resultaría prácticamente imposible apreciar la diferencia entre la potencia incidente y la potencia amplificada.

Por último, aunque utilicemos un láser, también hay que tener presente que emite simultáneamente varios modos longitudinales dentro del perfil de ganancia. Por tanto, la ganancia medida será un promedio de los factores de ganancia para las frecuencias de cada uno de los modos que oscilan dentro del perfil de ganancia del tubo. El promedio estará ponderado con unos pesos que dependerán de la potencia emitida en cada modo por el láser de referencia. Además, como los modos del láser no suelen ser totalmente estables y van *corriendo* a lo largo del perfil de oscilación, lo que realmente obtenemos es, aproximadamente, la ganancia media a lo largo del perfil del oscilación.

#### 4. Alineado de la cavidad láser

Para conseguir oscilación láser es necesario alinear la cavidad láser de forma que las pérdidas no sean mayores que la ganancia que nos puede proporcionar el tubo. Si este alineado se quiere llevar a cabo durante el desarrollo de una práctica docente se necesita seguir un método que sea rápido y sencillo, pero también

preciso. Se comprobó que el láser SP120B puede alinearse correctamente si se dispone de un láser auxiliar de alineamiento (otro láser de helio-neón) y un banco óptico siguiendo los siguientes pasos:

1. *Alineado del haz láser auxiliar con el banco* (mediante cualquiera de los métodos usuales).
2. *Identificación de los espejos*. Normalmente, el resonador de este tipo de láser está formado por un espejo plano de muy alta reflexión (99.8%) y un espejo cóncavo de menor factor de reflexión (97.2%). Con ayuda del láser auxiliar se identifican ambos espejos. Hay que tener en cuenta que, para evitar que se formen cavidades parásitas, las caras del espejo plano no son paralelas entre sí. Por tanto, el espejo plano habrá que colocarlo en el extremo del resonador más alejado al láser de alineamiento, tal como se muestra en la Fig. 6.

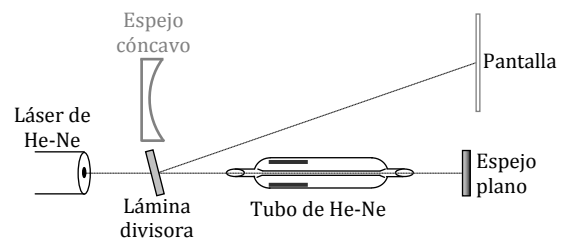


Fig. 6: Alineado de la cavidad láser con espejos separados (SP120B).

3. *Alineado del tubo*. Se alinea el tubo de descarga (apagado) con el haz láser auxiliar hasta conseguir que la imagen del spot después del tubo sea lo mejor posible.
4. *Alineado del espejo plano*. Se coloca el espejo plano después del tubo de descarga y, con ayuda de una lámina divisora, se busca que el spot reflejado por la lámina sea lo más puntual posible. Con este mismo criterio, se corrige la orientación del tubo. Conviene que la lámina esté lo menos inclinada posible para aminorar el desplazamiento lateral que introduce la lámina al haz de referencia.
5. *Alineado del espejo cóncavo*. En lugar de la lámina divisora, se coloca el espejo cóncavo y se procura que el haz de referencia, tras reflejarse en el espejo, retorne justamente a la cavidad del láser auxiliar. El alineado se afina buscando que



el spot a la salida del montaje sea lo más intenso y simétrico posible.

6. *Oscilación láser y centrado de los spots en los espejos.* Si el alineado se ha realizado de forma precisa, basta con encender el tubo de descarga y el láser comienza a emitir. No obstante, el spot del láser alineado no tiene por qué incidir en el centro del espejo plano, ya que el alineamiento de este espejo no es sensible a desplazamientos transversales al haz de referencia. Aunque esto no supone ningún problema para conseguir la oscilación láser, sí puede complicar el desarrollo de otras prácticas (observación de modos transversales, por ejemplo). El spot puede centrarse mediante pequeños desplazamientos transversales del espejo plano siempre que, tras cada desplazamiento, se corrija la orientación del espejo cóncavo para que no se interrumpa la emisión láser. Finalmente, puede afinarse el alineamiento de la cavidad optimizando la potencia emitida por el láser.

Con este procedimiento, la potencia máxima obtenida es de 5.7 mW por el espejo cóncavo y de 25  $\mu$ W por el espejo plano (mayor factor de reflexión). En la Fig. 7 se muestra la cavidad láser (SP120B) alineada y emitiendo. Se puede apreciar cómo el spot incide en el centro del espejo cóncavo, que los espejos están bastante alejados del tubo de descarga, a unos 10 cm de cada extremo, y que el láser emite en el modo transversal TEM<sub>00</sub> (modo fundamental), cuya distribución transversal de potencia se puede apreciar con mayor detalle en la Fig. 8 (fotografía de la distribución de potencia sobre una pantalla tras expandirla con una lente convergente).

Considerando que se cumple la aproximación paraxial (tamaño del spot sobre los espejos mucho menor que estos), la distribución de potencia en el plano transversal a la dirección de propagación es gaussiana. Para comprobarlo experimentalmente, y aunque la forma más rigurosa de realizar esta comprobación sería la medida de la potencia en todo el plano trasversal, es suficiente, teniendo en cuenta la imagen fotográfica de los modos que se muestra en la Fig. 8, con la medida de la variación de la potencia a lo largo de los ejes horizontal y vertical. Empleando un fotodiodo diafragmado (diafragma de 0.85 mm de diámetro) se

obtuvieron los resultados mostrados en la Fig. 9. Ajustando a gaussianas, la semianchura a 1/e del máximo es 10.2 mm para el eje horizontal y 10.6 mm para el eje vertical. Dada la sencillez del método empleado, los valores obtenidos son bastante aceptables, ya que ambos valores se diferencian en un 4% y el promedio del error relativo para los puntos ajustados es del 3%, aproximadamente.

Siguiendo el procedimiento descrito, también fue posible alinear correctamente el láser MG570 (el espejo que sella uno de los extremos del tubo desempeña el papel de espejo plano). Sin embargo, como la potencia de salida de este láser es muy baja (oscilando en el modo fundamental, 20  $\mu$ W), se necesitó emplear un filtro espectral en 632.8 nm para atenuar la emisión espontánea y apreciar mejor el spot que atraviesa el sistema.

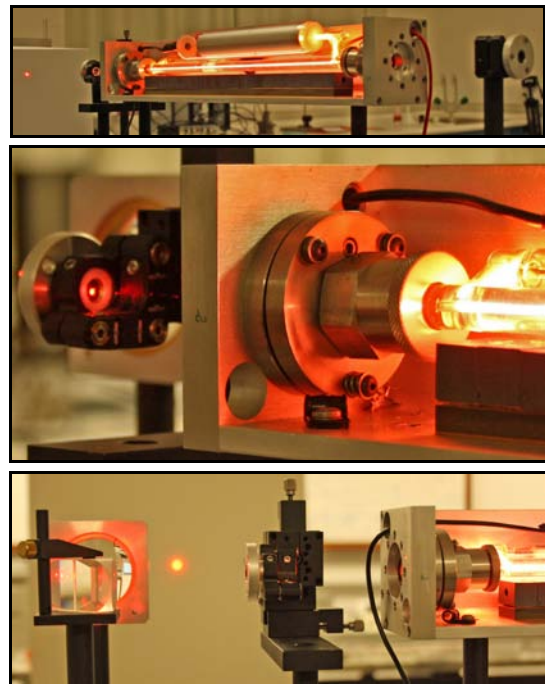


Fig. 7: Cavidad láser (SP120B) alineada y emitiendo.



Fig. 8: Distribución transversal de la potencia emitida (modo TEM<sub>00</sub>). En la foto con sobreexposición se aprecia la simetría radial de la distribución.

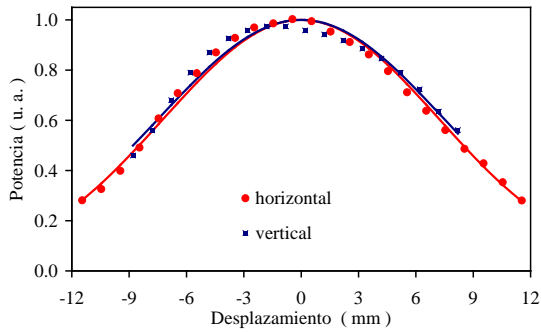


Fig. 9: Variación de la potencia emitida en el modo TEM<sub>00</sub> a lo largo de los ejes horizontal y vertical.

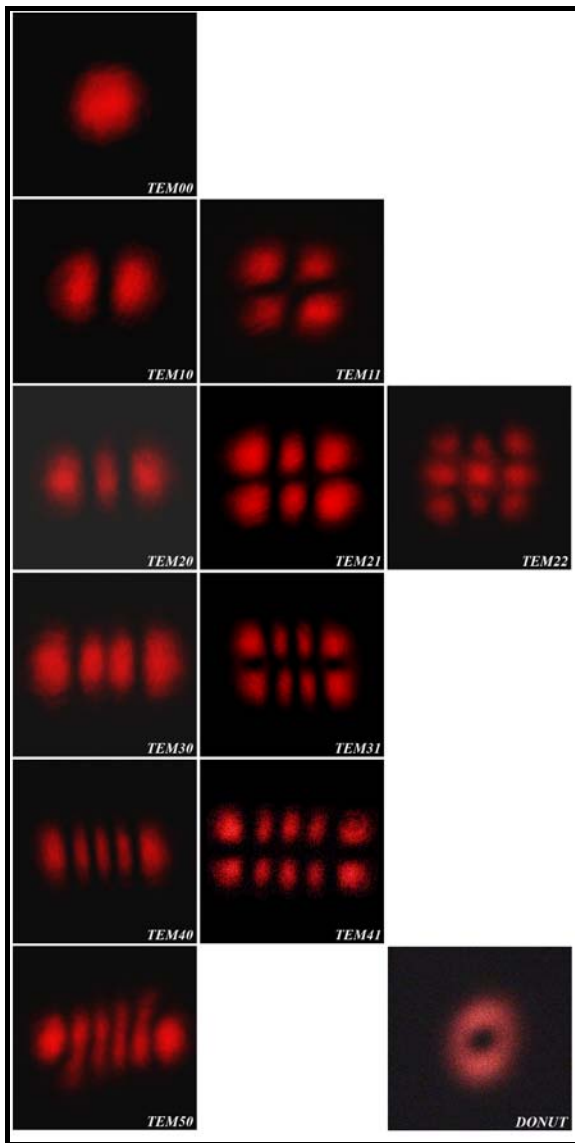


Fig. 10: Modos transversales observados con el láser MG570. El modo híbrido donut (“doughnut”) es una combinación lineal de los modos TEM<sub>01</sub> y TEM<sub>10</sub> [1].

## 5. Modos transversales de oscilación

A pesar de su interés docente, la observación de modos transversales de oscilación es una práctica difícil de encontrar en la bibliografía [9,23]. Además, una vez conseguida la oscilación láser puede resultar relativamente sencilla, ya que basta con ensayar pequeños giros o descentrar ligeramente alguno de los espejos del resonador. Sin embargo, con el láser SP120B sólo se pudo observar el modo fundamental, ya que el capilar de su tubo de descarga es muy fino y las pérdidas aumentan considerablemente al desalinearse la cavidad. Por el contrario, tal como se muestra en la Fig. 10, con el láser MG570 se observa fácilmente un gran número de modos transversales empleando esta técnica.

La mayor suma de ambos órdenes transversales es 5. Cuanto mayor sea este valor, más complicado resulta conseguir que el láser oscile en dicho modo.

Como el láser MG570 emitía muy poca potencia, se cambió el espejo separado de la cavidad por el espejo cóncavo del láser SP120B, consiguiendo entonces elevar la potencia de salida hasta 300 μW en el modo fundamental. En la Fig. 11 se muestran los modos transversales observados. No se consiguen tantos modos como en el caso anterior debido a que el espejo cóncavo del láser SP120B tiene un diámetro menor que el espejo del láser MG570.

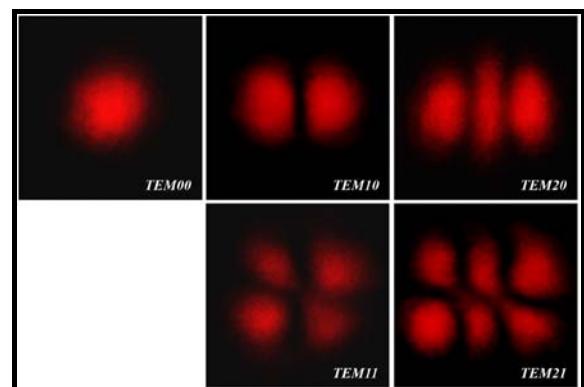


Fig. 11: Modos transversales observados con el láser MG570, pero con el espejo cóncavo del láser SP120B.

## 6. Modos longitudinales de oscilación. Selección de modos

Si se dispone de un interferómetro de Fabry-Pérot se puede observar cómo el láser de helio-neón oscila en varios modos longitudinales dentro del perfil de ganancia de la transición láser. Una vez calibrado el interferómetro, la separación espectral entre dos modos longitudinales consecutivos se determina fácilmente [24,25] siempre que únicamente oscile el modo transversal TEM<sub>00</sub>. Pero además, siempre que la cavidad no tenga ventana de Brewster, también puede comprobarse experimentalmente que los modos longitudinales están linealmente polarizados lo que permite realizar selección de modos. Por último, es posible demostrar que la selección de modos puede conseguirse situando una lámina plano-paralela de vidrio dentro de la cavidad.

Como analizador espectral se empleó un interferómetro Fabry-Pérot confocal (de espejos esféricos [26]) Spectra Physics 470-03, un fotodiodo y una resistencia de carga (en paralelo). Este interferómetro tiene un intervalo espectral libre (FSR) de 2 GHz, una finesse de 200, una resolución de 13 MHz y un rango espectral de operación desde 550 nm hasta 650 nm. El analizador espectral se calibró empleando el láser SP120. Teniendo en cuenta que el intervalo espectral libre del Fabry-Pérot es 2 GHz, se determinó que la separación entre dos modos longitudinales consecutivos de este láser es  $\Delta\nu=381 \pm 4$  MHz ( $L=39.4 \pm 0.4$  cm). Tanto el error estadístico relativo como la diferencia relativa con el valor especificado por Spectra Physics (385 MHz) son del 1%, aproximadamente. Además, el intervalo espectral de barrido del Fabry-Pérot resultó ser  $2.17 \pm 0.02$  GHz. El método de calibrado se resume gráficamente en las Figs. 12 y 13.

Las Figs. 12 y 13 también nos sirven para ver cómo la potencia en cada modo longitudinal depende del perfil espectral de oscilación. Este perfil podemos medirlo aprovechando que el conjunto de modos longitudinales se desplaza continuamente a lo largo de todo el perfil de ganancia hasta que el láser se estabiliza, de forma que la envolvente (perfil de oscilación) se visualiza promediando los barridos del

osciloscopio. El perfil de oscilación para este láser tiene una anchura espectral a media altura de 1 GHz (Fig. 14).

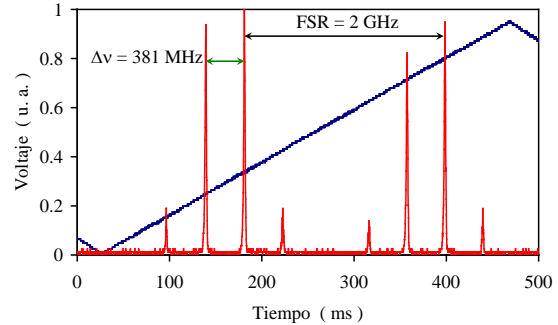


Fig. 12: Calibrado del interferómetro de Fabry-Pérot con el láser SP120. A partir del intervalo espectral libre se determina la separación espectral entre dos modos longitudinales consecutivos.

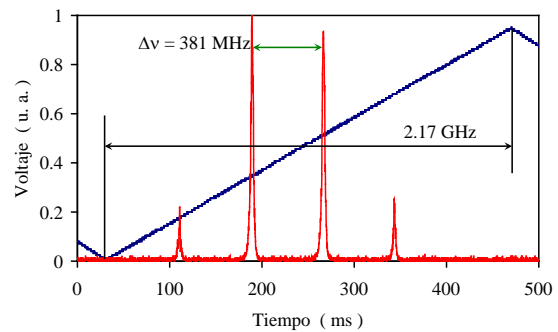


Fig. 13: Calibrado del interferómetro de Fabry-Pérot con el láser SP120. A partir de la separación espectral entre dos modos longitudinales consecutivos se determina el intervalo espectral de barrido.

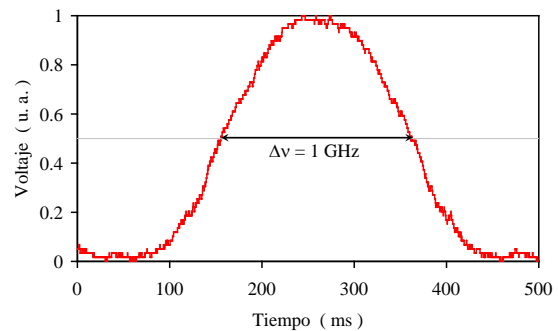


Fig. 14: Perfil de oscilación del láser SP120.

En cuanto a la resolución espectral, hay que tener en cuenta que, aumentando la resistencia de carga se consigue elevar el voltaje de respuesta del fotodiodo, pero a costa de empeorar la resolución de la medida (es decir, aunque la resolución del interferómetro de Fabry-Pérot es independiente de la resistencia de carga, la resolución del analizador espectral sí depende de ella). La resolución de las medidas realizadas es de 16 MHz (con una resistencia de 4.7 K $\Omega$ ). En las medidas del láser SP155, la resolución empeora hasta 63 MHz porque se empleó una resistencia de 220 K $\Omega$ , ya que este modelo de láser emite muy poca potencia.

Analizando espectralmente el láser MG911, se midió que la separación espectral entre los dos modos longitudinales que emite (Fig. 15) es 1.12 GHz ( $L=13.4$  cm). Colocando un polarizador lineal (prisma de Glan-Taylor) a la salida del láser se observó que ambos modos tienen estados de polarización lineales y ortogonales entre sí, lo que permite seleccionar fácilmente uno cualquiera de los dos modos.

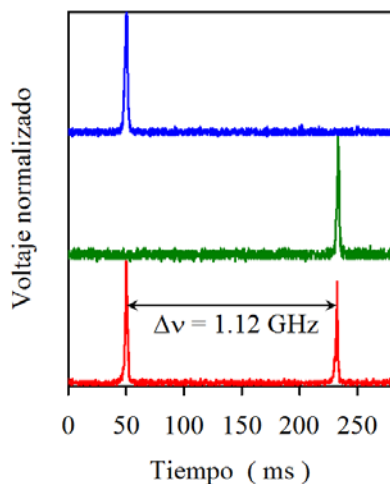


Fig. 15. Selección de los modos longitudinales del láser MG911 empleando un polarizador lineal externo.

Analizando el láser SP155 se observan tres modos longitudinales, separados 558 MHz ( $L=26.9$  cm). Empleando de nuevo el polarizador lineal se puede seleccionar uno cualquiera de los tres modos, ya que siempre ocurre que dos de ellos tienen el mismo estado de polarización, que es ortogonal al estado del tercer modo. Este

comportamiento se debe a la combinación de dos efectos, anisotropías en el tubo y competición de modos [27].

Finalmente, se analizó espectralmente la emisión del láser SP120B, el cual, debido a que podemos tener los espejos bastante separados del tubo nos ofrece dos ventajas a priori. Por una parte, permitiría incluir elementos ópticos dentro de la cavidad para seleccionar modos longitudinales. Por otra, haría posible observar y medir las frecuencias de los modos longitudinales cuando oscilan simultáneamente varios modos transversales, lo que serían unas medidas verdaderamente interesantes [28-29]. Lamentablemente, como se alinea el láser en banco óptico, los soportes no proporcionan la suficiente estabilidad e impiden obtener un espectro estable.

No obstante, promediando con el osciloscopio (128 promedios) se puede medir un espectro (curva superior de la Fig. 16) en el que se aprecian 6 modos longitudinales, aunque con poca resolución debido a que la posición de los modos fluctúa en torno a la posición que le correspondería si la cavidad fuese estable. A partir de este espectro, se obtiene que  $\Delta\nu=250$  MHz ( $L=60$  cm), aproximadamente.

Sin embargo, midiendo de esta forma sí se comprobó cómo es posible seleccionar modos introduciendo dentro de la cavidad una lámina planoparalela de vidrio BK7 de 6.35 mm de espesor. Esta selección de modos se consigue modificando el alineamiento de la lámina, lo que permite aumentar ligeramente las pérdidas de la cavidad, debido al desplazamiento del haz láser confinado en la cavidad. Entonces, la ganancia para algunos modos no será lo suficientemente alta para compensar las pérdidas y no podrán oscilar. Es decir, el aumento de las pérdidas conlleva un estrechamiento del perfil de oscilación del medio activo, limitando el número de modos longitudinales que oscilan. Como se puede apreciar en la Fig. 16, este método reduce claramente el número de modos, llegando incluso a conseguir que oscile un único modo longitudinal. Como es lógico, y aunque no se aprecie en la Fig. 16 porque los espectros están normalizados a altura unidad, la potencia que emite el láser disminuye al aumentar las pérdidas de la cavidad. Teniendo en cuenta la

longitud de la cavidad, la lámina modifica sólo en un 0.5% la separación espectral entre modos longitudinales, lo cual apenas tiene influencia para nuestros propósitos.

Aunque podría considerarse que la lámina actuase como un *etalon*, es decir, introduciendo máximos y mínimos interferenciales, la separación entre dos máximos consecutivos sería 16 GHz aproximadamente y, como sus caras no llevan recubrimientos, la transmisión mínima es del 85%. Por tanto, las pérdidas por este mecanismo serían prácticamente iguales para todos los modos y, como el ensanchamiento de la transición es inhomogéneo, no se conseguiría la selección de modos.

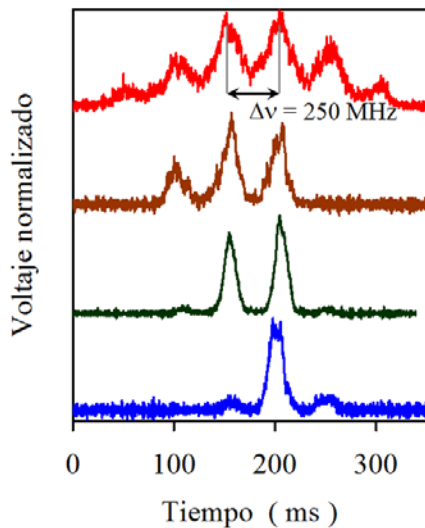


Fig. 16. Selección de los modos longitudinales del láser SP120B colocando una lámina planoparalela en el interior de la cavidad (la curva superior corresponde a la cavidad sin lámina)..

## 7. Conclusiones

Trabajando con láseres y tubos de helio-neón de bajo coste, se ha expuesto un conjunto de prácticas docentes de laboratorio que ilustran conceptos importantes sobre láser e interacción luz-materia: emisión espontánea, amplificación óptica, alineamiento de cavidad láser, modos transversales y modos longitudinales.

Estas prácticas también son útiles para que los alumnos trabajen en algunas técnicas experimentales básicas: identificación de líneas espectrales, espectroscopia de baja resolución con monocromador, espectroscopia de alta resolución con el interferómetro de Fabry-Pérot, etc.

Dependiendo de cómo se organice su desarrollo en el laboratorio, estas prácticas pueden adaptarse a nivel de grado (siempre que el alumno haya cursado previamente las asignaturas básicas sobre Óptica) o de máster, excepto la práctica dedicada al análisis espectral y a la selección de modos longitudinales, que resultaría más adecuada para un curso de máster.

Lógicamente, se pueden llevar a cabo muchas más prácticas con láseres de helio-neón, las cuales completarían el conjunto expuesto. Además, los montajes experimentales de bastantes de estas prácticas tampoco necesitan material excesivamente sofisticado o caro. A modo de ejemplo, podemos citar las siguientes:

- medida de la divergencia del haz láser,
- análisis de la polarización del haz láser, tanto fuera como dentro de la cavidad,
- estudio del criterio de estabilidad del resonador,
- amplificación en otras transiciones del neón (por ejemplo, en la de 543.4 nm),
- medidas de ganancia espectral de la transición láser, y
- análisis de la emisión espontánea cuando el tubo está sometido a un campo magnético externo (efecto Zeeman).

## Agradecimientos

A los autores les gustaría agradecer al profesor Dr. D. José Miguel Álvarez Abenia sus recomendaciones y consejos para la realización de este trabajo.