

Láseres de colorantes pulsados para fines didácticos

M. VILLAGRÁN M.

Laboratorio de Optica Aplicada, CIUNAM

Apartado postal 70-186, 04510 México, D.F., México

Recibido el 27 de octubre de 1994; aceptado el 10 de febrero de 1995

RESUMEN. Se presenta el diseño, construcción, parametrización y forma de operación de láseres pulsados de colorantes económicos y fáciles de instrumentar por estudiantes sin experiencia previa. Se analizan las configuraciones Littrow y de red rasante; se presentan alternativas simples para reducir el ancho de banda y se estudia la energía umbral y el enfoque del haz de bombeo en experiencias didácticas. Estos láseres son bombeados por láseres de N_2 sencillos y económicos, que emiten en el ultravioleta (337 nm), lo que permite excitar colorantes con espectros de emisión desde 357 a 708 nm, con rangos de sintonía entre 30 y 60 nm.

ABSTRACT. This work presents the design, construction and parametrization of pulsed dye lasers, which are economic and easily instrumented by undergraduate students without previous experience. It analyzes the Littrow and grazing incidence configurations and presents simple alternatives to reduce the band width. Also studied are the threshold energy and the pump beam focus in didactic experiments. These lasers are pumped by simple and economic N_2 lasers that emit at ultraviolet wavelength (337 nm), which allows to pump dyes with emission spectrums from as low as 357 to 708 nm, and a tuning range between 30 and 60 nm.

PACS: 01.50.Pa; 42.55.Mv; 42.60.By

1. INTRODUCCIÓN

Los láseres de colorantes (o de pigmento) se caracterizan por emplear como medio activo moléculas orgánicas en solución que, en la mayoría de los casos, son excitadas ópticamente por lámparas de flash o por láseres continuos o pulsados. La propiedad más importante es que la emisión estimulada puede ser sintonizada sobre toda la banda de emisión del colorante, con valores típicos para intervalos de sintonía de 50 nm. La emisión láser se produce en transiciones de fluorescencia de estas moléculas que, en general, tienen espectros anchos y continuos [1,2].

Si bien existe una gran variedad de láseres sintonizables, los de colorantes son por muchas razones los más versátiles, ya que poseen una elevada ganancia, lo que permite operarlos con longitudes activas muy cortas, con factores de amplificación de hasta 10^8 cuando son utilizados como amplificadores. Dado que el medio activo es un líquido, le otorga una serie de ventajas tales como: facilidad de operación, posibilidad de hacer fluir el colorante para evitar efectos de calentamiento y descomposición, recambio fácil y bajo costo. El inconveniente es que los colorantes son sustancias cancerígenas que se deben manejar con mucha precaución.

Si se adaptan las cavidades ópticas convenientemente, se puede canalizar toda la energía de emisión en una banda muy angosta de longitud de onda, del orden de ancho de

línea atómico, sintonizable y de elevada potencia [3]. La gran variedad de colorantes desarrollados por los métodos de síntesis de la química orgánica, permiten obtener emisión sintonizable en cualquier parte del espectro (355–1018 nm) para el bombeo con láseres de N_2 [4].

La teoría de operación y consideraciones de diseño han sido ampliamente estudiadas para láseres pulsados con bombeo transversal [1–3]. Los láseres excitados con lámparas de flash para ser construidos por estudiantes en forma sencilla y económica también han sido reportados [5].

Si bien los láseres de colorantes bombeados por láseres de N_2 han sido ampliamente estudiados [2], recientemente se ha reportado la construcción simple y económica de láseres de N_2 [6] y se plantea como una experiencia didáctica para los estudiantes la utilización de éstos en la excitación de láseres de colorantes. En este trabajo se presentan distintas alternativas para el bombeo, las consideraciones de diseño, la forma de operación y la parametrización de láseres de colorantes que pueden ser instrumentados fácil y rápidamente por estudiantes de nivel medio y superior.

En la Sec. 2 se presentan las distintas configuraciones para los láseres de colorantes, en la 3 los elementos utilizados y en la 4 los resultados obtenidos. En la Sec. 5 se describe la forma más simple de instrumentar estos láseres, su forma de alineación y de operación y se presentan dos experiencias didácticas para la comprensión de los mecanismos de funcionamiento de los mismos.

2. CONFIGURACIONES PARA LOS LÁSERES DE COLORANTE

Si bien han sido estudiados varios tipos de geometrías de excitación, los sistemas de bombeo transversales resultan ser los más convenientes [3]. En este tipo de configuración, el láser de bombeo es enfocado por una lente cilíndrica sobre una de las caras de la celda que contiene el colorante. Como el coeficiente de absorción de éste es grande, el haz de excitación se atenúa rápidamente, de modo que la máxima inversión de población en la celda se alcanza en una pequeña zona, a lo largo de la línea focal de la lente cilíndrica, muy cerca de la cara de la celda sobre la que se irradia. La cavidad normalmente es formada por la combinación de dos espejos, o bien, un espejo y una rejilla de difracción. Las variaciones con respecto al sistema de resonadores, así como el uso de diversos tipos de selectores de longitud de onda, permiten obtener anchos de línea con diversos grados de angostamiento y sintonía en toda la banda de ganancia del colorante.

El elemento básico empleado como selector de sintonía es una rejilla de difracción colocada en reemplazo de uno de los espejos de la cavidad. Existe una gran variedad de montajes y configuraciones que permite un amplio intervalo de anchos de línea entre 10 nm y 10^{-4} nm , con eficiencias que van desde un 20% al 2%, respectivamente [7], para el bombeo con láseres de N_2 .

Aspectos tales como calidad del haz, sencillez de alineación y economía de componentes, dependen del tipo de configuración elegida. En la Fig. 1 se muestra un esquema de la forma más sencilla de instrumentar una cavidad óptica selectora con el mínimo de elementos, denominada configuración Littrow. En este montaje, la salida del haz puede hacerse ya sea por el espejo de acoplamiento o por algún orden de difracción de la misma red. El

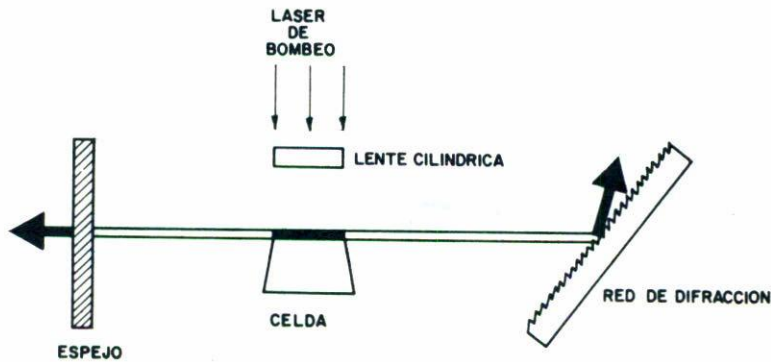


FIGURA 1. Montaje Littrow y sus dos posibles configuraciones de salida.

sistema se comporta de manera tal que durante el comienzo del pulso de fluorescencia emitida por el colorante, ésta es enviada en todas direcciones. Una pequeña fracción es reflejada en el espejo de la cavidad y retorna al medio excitado, donde es amplificada y reemitida en forma de haz intenso y bien colimado. Esta emisión espontánea amplificada (ASE) incide entonces sobre la rejilla, la cual la dispersa de modo que sólo una pequeña banda, cuyo ángulo de incidencia coincide con el de difracción, llegará de nuevo a la celda. Esta porción del espectro del colorante es entonces reamplificada, para finalmente emerger por el espejo de salida en la forma de un haz láser de fuerte intensidad y reducido ancho de banda.

Al colocar la rejilla en forma rasante, la posibilidad de reducir el ancho de banda pasivo del sistema utilizando una mayor zona de la rejilla, no resulta práctica si se piensa en un montaje convencional. Sin embargo, es posible lograr el efecto buscado mediante un montaje como el mostrado en la Fig. 2, denominado configuración con red rasante [2]. Cuando el haz incide sobre la rejilla, el primer orden será difractado en dirección al espejo E_2 de reflexión total. El haz difractado tendrá una alta dispersión angular, de modo que sólo un pequeño intervalo de longitudes de onda tendrá la dirección perpendicular al espejo y se reinyectará por un camino inverso en la celda. Así la longitud de onda (λ) que se reinyecte dependerá de la posición del espejo, que funcionará como selector en λ . La salida puede hacerse por el orden cero de la rejilla, o bien por el espejo de acoplamiento (E_1).

Sobre la base del análisis de los diseños discutidos, se estudiaron y fueron instrumentados los dos tipos de configuraciones mencionadas: el montaje Littrow y la configuración de red rasante. En el primer caso se buscó obtener una alta eficiencia con moderados anchos de línea, ideal para aplicaciones didácticas que se discutirán más adelante. El montaje de red rasante resulta en cambio muy adecuado para el caso de aplicaciones en las cuales los sistemas a excitar se caracterizan por bandas de absorción angostas o para las técnicas espectroscópicas de diagnóstico de plasmas, donde es necesario lograr anchos de emisión del orden del ancho de línea atómico [8].

Los elementos desarrollados y la estructura del sistema fueron construidos de manera que permiten cambiar fácil y rápidamente de configuración, colorante, láser de bombeo y adicionarle etapas amplificadoras, posibilitando el montaje de otros sistemas además de los mencionados.

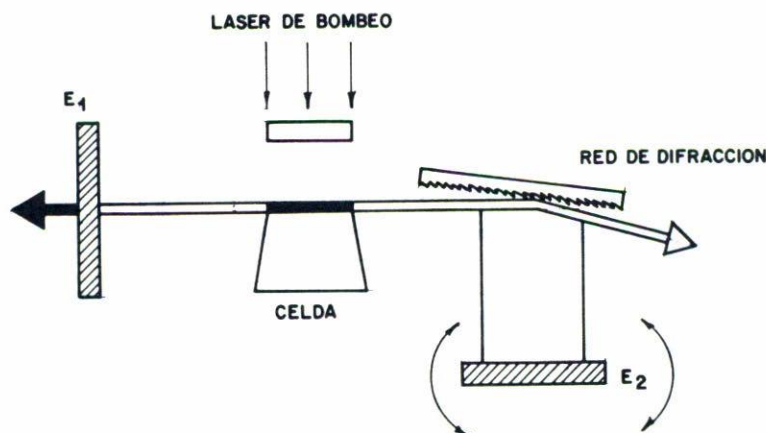


FIGURA 2. Configuración con red rasante

TABLA I. Láser de bombeo.

Características	Especificaciones
Potencia pico	76 kW
Ancho de pulso efectivo	2.9 ns
Energía por pulso	220 μ J
Repetición	1-20 p.p.s.
Potencia promedio	4.4 mW
Longitud de onda	337.1 nm
Ancho de banda	0.5 nm
Dimensiones de haz	1 \times 3 mm
Divergencia del haz	4 miliradianes en ancho 22 miliradianes en largo

3. ELEMENTOS UTILIZADOS

3.1. Láser de bombeo

Si bien se han utilizado varios láseres para la excitación de los colorantes, como láseres de N_2 de baja presión [9] y láseres de Nd:YAG [10], los resultados que se presentan son para el bombeo con un láser sencillo de N_2 [6], emitiendo en 337.1 nm, de descarga transversal, a presión atmosférica, con circuito Blumlein, cuyas características se especifican en la Tabla I.

La excitación de colorantes con este tipo de láseres tiene, además de su construcción simple y económica, ventajas adicionales, en particular, la duración temporal de los pulsos que al ser del orden de los nanosegundos, determina que la población de estados de energía del colorante que no contribuyen al proceso de emisión estimulada (estados tripletes) no alcancen valores apreciables [1,2]. De este modo los colorantes pueden ser bombeados en volúmenes pequeños, contenidos en celdas convencionales del tipo de las utilizadas en los espectrofotómetros. Dado que la energía es baja ($< 220 \mu$ J), no es necesaria la

utilización de circuladores o agitadores del colorante para evitar su degradación por efectos del calentamiento.

3.2. Óptica

La celda que contiene al colorante es de cuarzo con una pared de 0.1 cm (Hellma modelo 120-QS) de forma cilíndrica ($\phi = 22$ mm), lo que permite evitar la realimentación del haz por reflexiones en las paredes. Se usaron también celdas rectangulares (Hellma 161 QS) como las que utilizan los espectrofotómetros, las que deben de ubicarse en forma inclinada (aproximadamente 10°) para evitar la realimentación en las paredes que actúan como espejos e impiden la selección de longitudes de onda con los elementos de sintonía de la cavidad.

Se utilizaron lentes cilíndricas de cuarzo (ϕ : 2.5–5.5 cm y f : 5, 10 y 20 cm) para enfocar la radiación de bombeo sobre la celda y están montadas sobre una base móvil que permite el ajuste de la zona excitada minimizando las pérdidas como se verá en la Sec. 5.

Las rejillas de difracción son de tipo holográfico (Spectrogon de $30 \times 40 \times 10$ mm con 1800 o 2400 líneas/mm) reforzadas (blaze) en 500 nm y son montadas sobre estructuras comerciales (Newport, modelos 610 y 610S) controladas por tornillos micrométricos para su alineación y sintonía.

Para reducir el ancho de banda en la configuración de red rasante, utilizando una mayor zona de la rejilla de difracción, se utilizó un sistema expansor X7, modelo 52–51 de Special Optics.

La salida del láser se hizo a través de la red o bien por una cuña de cuarzo (para evitar reflexiones), fabricada y pulida en el INAOE, Puebla. Los otros espejos son de aluminio, de reflexión total de primera superficie y cuando son utilizados para sintonizar, éstos también son colocados en monturas con movimiento micrométrico.

3.3. Instrumentos de medida

En la Tabla II se muestran los colorantes de Exciton [4] utilizados, la longitud de onda pico, el intervalo de sintonía, la eficiencia relativa de cada uno de ellos a la Cumarina 503, el tipo de solvente, las concentraciones óptimas y la absorción para $\lambda = 337.1$ nm que fue obtenida con un espectrofotómetro Shimadzu, modelo UV-160 (PC).

Los espectros de fluorescencia y el intervalo de sintonía de los diversos colorantes se obtuvieron enfocando la salida del láser a una fibra óptica de cuarzo modelo LG-456, adosada a un monocromador modelo SpectraPro de 275 mm de distancia focal, con una red de 1200 líneas/mm, adosándole un fotomultiplicador R298 controlado por una PC mediante la interfase PS-445, todos los instrumentos de Acton Research Corp.

Para medir a tiempo real los intervalos de sintonía, anchos de banda e influencia de la emisión espontánea amplificada (ASE) para las distintas configuraciones y colorantes, se utilizó un analizador óptico multicanal (OMA) modelo ST-120 de Princeton Instruments Inc., con detector IRY-700S/RG compuesto por un arreglo de 1024 fotodiodos en 25 mm, dando una resolución de 0.065 nm por canal.

La calibración en longitud de onda se realizó con un conjunto de lámparas espectrales (Oriel, modelo 6053) y la respuesta en intensidad de todo el sistema (fibra, monocromador, fotomultiplicador u OMA), se corrigió con una lámpara de tungsteno-halógeno (Oriel, modelo 6332).

TABLA II.

Colorante	Pico (nm)	Intervalo (nm)	Eficiencia	Solvente	Concentración (g/l)	Absorción (l/mol × cm) 10 ⁻⁴
BPBD-365	362	357-390	0.14	DI	1.6	0.7
PBBO	394	385-413	0.37	DI	0.15	4.3
Stilbeno 420	425	405-460	0.7	ME	0.22	1.2
Cumarina 460	453	433-486	0.95	ME	0.66	0.6
Cumarina 503	504	479-548	1	ME	1.6	0.2
Cumarina 540A	538	515-592	0.89	ME	3.1	0.2
Rodamina 590	580	570-615	0.94	ME	1.63	0.5
Rodamina B	620	599-650	0.87	ME	2.1	0.5
DCM	660	628-708	0.7	DMSO	0.5	1.0

DI: dioxano; ME: metanol; DMSO: sulfóxido de dimetilo.

Los anchos de banda de las configuraciones que no podían ser resueltas por el sistema monocromador-OMA, se midieron con un analizador de espectros ópticos, Coherent Tropel Division, modelo 240, con controlador modelo 251, con un intervalo espectral libre (FSR) nominal de 7.5 GHz en la región de 450 a 550 nm. Este sistema también puede ser utilizado como un filtro pasa banda ultra-angosto a la salida del láser.

La energía de los pulsos se midió con un detector piroeléctrico RjP-735, para energías menores a 2 μ J, se utilizó un detector de silicio modelo RjP-765, ambos controlados por un medidor RjP-700 de Láser Precision Corp.

El ancho medio de los pulsos se obtuvo con un fotodiodo de silicio, Motorola MRD721, con tiempo de respuesta menor a 1 ns polarizado a 24 V, en conjunto con un osciloscopio digital modelo TDS 540 de 500 MHz de ancho de banda y un graficador HC100 de Tektronix. Las mismas formas de señal se obtuvieron con un detector de 700 MHz (también de Tektronix), modelo P6701, con lo que se asegura que el ancho del pulso no está deformado por la electrónica de registro.

4. RESULTADOS

En la Fig. 3 se muestra la forma temporal de un pulso del láser de colorante con Cumarina 503, emitiendo en 504 nm con configuración de red rasante, con un ancho medio (FWHM) de 2.5 ns. La energía máxima lograda con esta configuración es de 24 μ J (eficiencia del 11%) y ancho de banda de 0.004 nm, en la que se ha utilizado el sistema expensor antes de la rejilla de difracción. El reemplazo del espejo de sintonía por una rejilla de difracción (1800 l/mm) [11], reduce el ancho de banda a expensas de disminuir la energía de salida (4 μ J, eficiencia del 1.8%).

La repetibilidad y estabilidad de los pulsos para una frecuencia de bombeo de 20 Hz, fueron analizados para ambas configuraciones con variaciones del 8% para montaje con una sola rejilla y del 20% cuando se utilizan dos rejillas. Se estudiaron configuraciones en las que se buscó reducir el ancho de banda utilizando prismas con el montaje Littrow

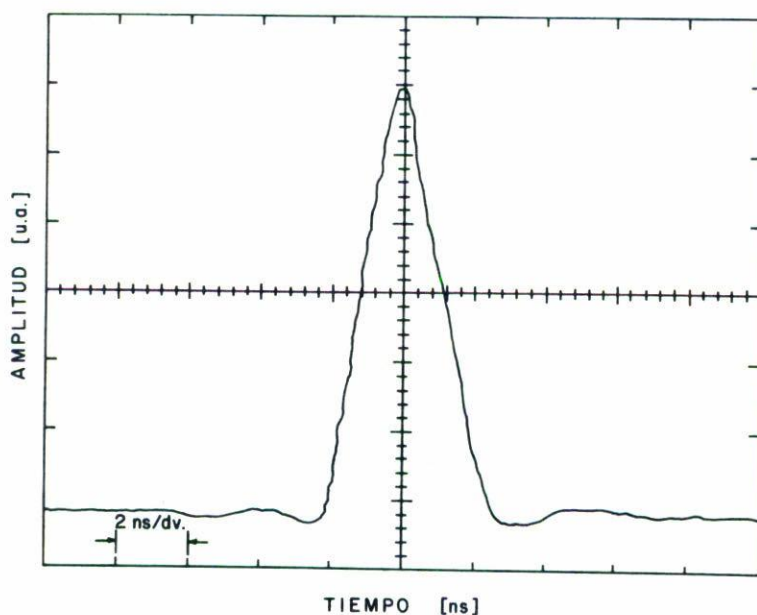


FIGURA 3. Pulso del láser de la Cumarina 503, ($24 \mu\text{J}$) bombeado en 337.1 nm con $220 \mu\text{J}$, emitiendo en 504 nm en configuración de red rasante, con un ancho de banda de 0.004 nm .

y con el montaje de red rasante, encontrando anchos de banda similares a los reportados [12–14], pero con variaciones de la amplitud de los pulsos mayores al 40%. Dadas estas inestabilidades y las dificultades para la alineación de los prismas, es preferible utilizar sistemas telescópicos expansores y dos rejillas cuando se busca un ancho de línea reducido.

En la Fig. 4 se muestra un espectro típico de la configuración Littrow sin optimizar para la Rodamina 590, donde se aprecia la emisión láser en 595 nm y el ASE centrado en 580 nm . La ventaja de utilizar el sistema monocromador-OMA para analizar el espectro de emisión y sintonía de los colorantes o mezclas de ellos, reside en que, a tiempo real, se puede visualizar y minimizar el ASE, ajustando la alineación de los componentes (lentes de enfoque, espejos, rejillas, largo de cavidad, concentraciones) y óptica adicional (prismas, etalones, telescopios) que se utiliza para reducir el ancho de línea en otras configuraciones además de las mencionadas.

En la Tabla III se presentan las características medidas con el montaje Littrow y de red rasante, presentando especificaciones similares a los láseres comerciales [15], con menor ancho de banda en algunas regiones, y que pueden ser construidos a una cuarta parte de su valor comercial.

5. ARREGLOS SIMPLES Y EXPERIENCIAS DIDÁCTICAS

En las secciones anteriores se ha descrito la construcción y parametrización de los láseres de colorantes en diversas configuraciones con accesorios mecánicos (monturas micrométricas, bases móviles, etc.) e instrumentos de medición (anализador de espectros, OMA, fotomultiplicador, osciloscopio, etc.) caros y sofisticados, usuales en los laboratorios de investigación

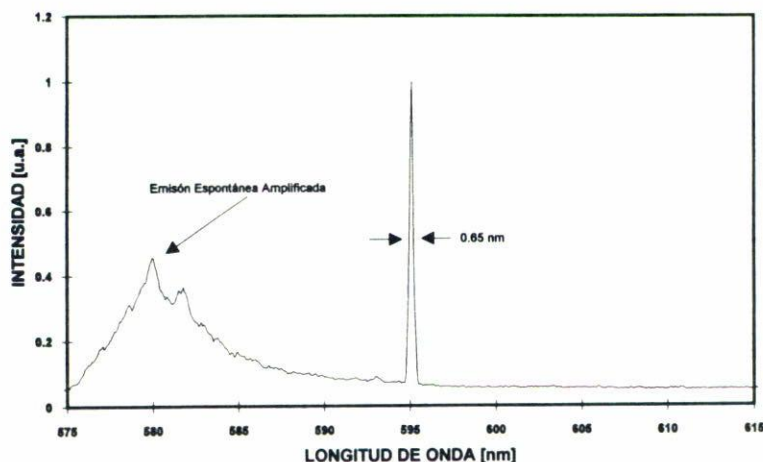


FIGURA 4. Espectro de emisión de la Rodamina 590 con montaje Littrow, sintonizado en 595 nm y ASE centrado en 580 nm, bombeada en 337.1 nm con 220 μJ .

TABLA III. Láser de colorante.

Características	Especificaciones
Intervalo de sintonía	357–708 nm
Potencia pico a 504 nm	17.6 kW
Ancho de pulso efectivo	2.5 ns
Energía por pulso	44 μJ
Repetición	1–20 p.p.s.
Potencia promedio	0.88 mW
Ancho de banda:	
Littrow	0.3–1.1 nm
red rasante	0.004 nm
Divergencia del haz	3 miliradianes

pero no en los de enseñanza. En esta sección se exponen los detalles para la construcción simple de un láser de colorante, así como la forma de alineación y operación, basados en que se utiliza el láser de N_2 [6] para el bombeo. Se presentan también dos experiencias didácticas tendientes a facilitar la comprensión de aspectos del medio atómico, la óptica de enfoque y la física de estos láseres.

Se ha elegido como colorante la Rodamina 590 para estas experiencias, aun cuando su eficiencia es menor que la Cumarina 503, la sintonía de la emisión puede observarse a simple vista, sin necesidad de un monocromador, que va desde el verde al rojo (570–615 nm), teniendo su máximo (580 nm) en el amarillo. Adicionalmente este colorante es uno de los más económicos (19 dol./gr) y fáciles de conseguir.

La forma más simple de lograr amplificación es utilizando una cavidad formada por un espejo plano (100% reflector, de primera superficie) y como espejo de salida, un espejo parcialmente reflector [12], que simplemente puede ser un portaobjetos de microscopio,

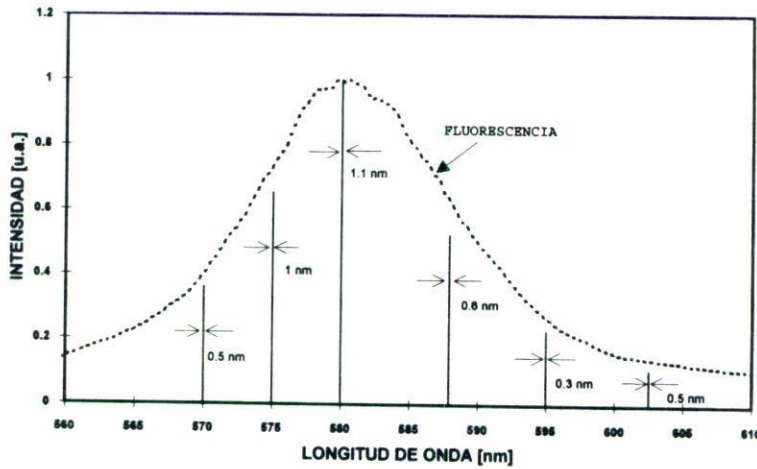


FIGURA 5. Fluorescencia y anchos de línea para Rodamina 590 con montaje Littrow para varias longitudes de onda, bombeadas en 337.1 nm con 220 μJ .

ambos colocados en monturas que permitan el movimiento en dos ejes para la alineación de la cavidad.

Al enfocar con la lente cilíndrica el haz de bombeo sobre la celda que contiene el colorante, se observan dos puntos intensos de fluorescencia a ambos lados de la misma. Como primer paso para la alineación, se debe de reflejar con el espejo posterior esta fluorescencia sobre la zona de excitación. Del otro lado de la celda se obtiene un incremento de la fluorescencia (ASE), que nuevamente debe de ser reflejada sobre la celda por el otro espejo sobre la zona de excitación. Si se utiliza un portaobjetos como espejo de salida, éste dará dos reflexiones (una por cada cara) y se deberá de cuidar que la que se refleje sobre la celda sea la de la primera cara. Una vez alineada la cavidad, ésta comienza a amplificar y la sintonía se logra desalineando levemente alguno de los espejos. Con esta configuración se obtienen eficiencias mayores al 10% con anchos de banda variables de 7 a 10 nm.

El montaje Littrow (Fig. 1) permite reducir el ancho de banda y la forma de alineación es igual al anterior, teniendo que reflejar sobre la celda el orden cero de la rejilla de difracción. Con esta configuración se obtienen eficiencias del 20%, con anchos de línea variables entre 0.3 y 1.1 nm dependiendo de la región de sintonía. En la Fig. 5 se muestra el espectro de fluorescencia de la Rodamina 590 junto con la intensidad relativa al máximo de emisión en 580 nm y los anchos de línea medidos para varias longitudes de onda.

Los resultados de una primera experiencia que permiten determinar la energía umbral de bombeo se muestran en la Fig. 6. Se aprecia que con energías de bombeo de 60 μJ comienza la amplificación, encontrando su valor óptimo en 100 μJ y se mantiene constante (saturación del medio) hasta los 220 μJ , que es la máxima energía del láser de bombeo. La variación de la energía de bombeo puede realizarse simplemente con cubreobjetos de microscopio.

La alineación y enfoque de la lente cilíndrica es un elemento crítico para el funcionamiento del láser. La alineación debe ser hecha cuidando que la reflexión de la cara anterior de la lente regrese sobre sí misma. Para estudiar la distancia óptima entre la lente y la pared anterior de la celda (de 1 mm de espesor) que contiene al colorante, se montó

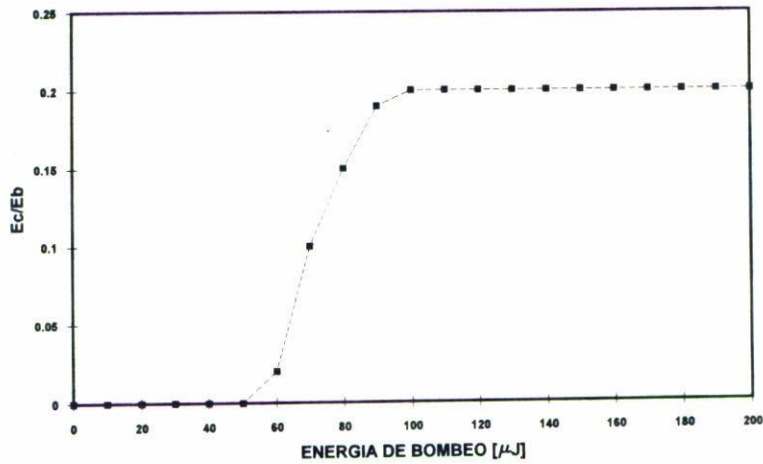


FIGURA 6. Energía de salida para Rodamina 590 (E_c) normalizada a la energía de bombeo (E_b), en función de la energía de bombeo para el montaje Littrow.

una lente de 10 cm de distancia focal en una base móvil con desplazamientos de 12 mm alrededor de la distancia de enfoque. En la Fig. 7a se muestra cómo varía la eficiencia óptica del láser de colorante, definida como la energía de salida (E_d) normalizada a la energía de bombeo (E_b), para distintas distancias de enfoque. Se observan dos puntos óptimos para la eficiencia, situados en 97 y 101 mm y que justo a la distancia focal de la lente (99 mm) la eficiencia del láser cae notablemente. La Fig. 7b muestra las medidas del ASE normalizadas a la energía de bombeo (E_a/E_b) para esas mismas distancias, encontrando su máximo en 99 mm.

Los resultados anteriores muestran que no se debe de colocar la lente cilíndrica exactamente a la distancia focal, debido a que se reduce el volumen del medio activo, saturándolo e incrementando el ASE. Las dos distancias donde se obtienen las máximas eficiencias (97 y 101 mm), se deben a que en estas posiciones el volumen excitado por la cintura del haz de la lente [2] es el adecuado. De estas dos, en la de 97 mm el foco del haz de bombeo cae dentro de la celda, aumentando la inestabilidad de los pulsos y el ASE. En la posición de 101 mm, es decir 2 mm corrida hacia atrás respecto a la distancia focal, el foco cae fuera de la celda y se obtiene la mayor eficiencia (20%) con la mínima cantidad de ASE.

Se han descrito dos experimentos sencillos donde el instrumental necesario es mínimo y permiten estudiar aspectos físicos (energía umbral, saturación, volumen excitado, influencia del ASE, etc.) de estos láseres.

Si se cuenta con un monocromador y un detector sensible, es sencillo realizar medidas de ganancia [16] para los diversos colorantes o mezclas de ellos en distintos solventes y concentraciones con el objeto de extender el intervalo de sintonía.

6. CONCLUSIONES

Se han construido láseres de colorantes sencillos, que con un mínimo de componentes permiten obtener sintonía en un intervalo de 351 nm utilizando nueve colorantes. Las

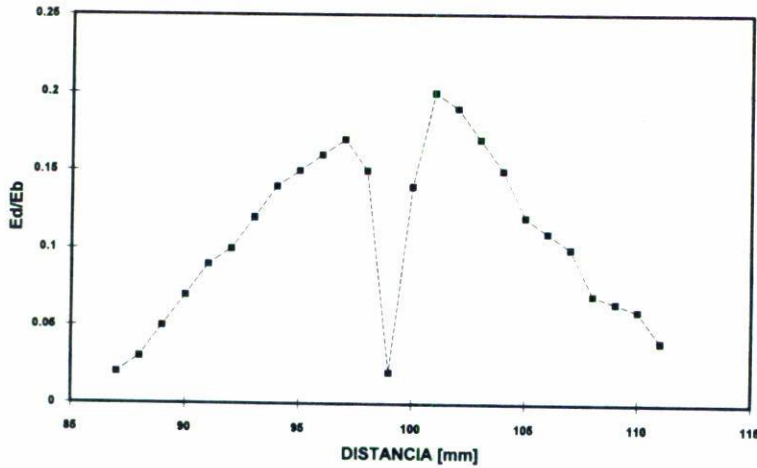


FIGURA 7A. Energía de salida del colorante para Rodamina 590 (E_c) normalizada a la energía de bombeo (E_b) en función de la distancia de enfoque.

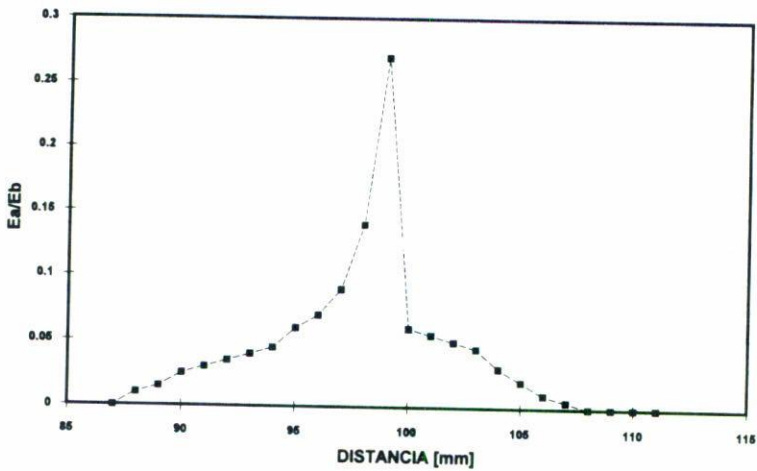


FIGURA 7B. Energía de ASE (E_a) normalizada a la energía de bombeo (E_b) en función de la distancia de enfoque.

energías obtenidas son mayores que la de láseres comerciales y con anchos de banda más reducidos (0,004 nm), lo que permite la utilización de estos láseres en aplicaciones donde se requieran energías menores a 40 μJ .

Si bien los resultados que se presentan son para el bombeo con láseres de N_2 , éstos se pueden excitar con otros láseres (excímeros, 2do. y 3er. armónico de Nd:YAG) o funcionar como osciladores para láseres de colorantes con etapas amplificadoras.

En la construcción y caracterización de estos láseres, y mediante prácticas sencillas con ellos, las experiencias adquiridas por los estudiantes son formativas, presentando además múltiples posibilidades de investigación en técnicas de espectroscopía por su capacidad de sintonía, anchos de línea y elevada potencia pico.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por la DGAPA-UNAM (proyectos #DO103592, IN103692) y CONACyT (proyecto #1648-A9209).

REFERENCIAS

1. F.P. Schafer, "Dye Laser", *Topics in Applied Physics*, Vol. 1, 3a. edición, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg (1990).
2. M. Fernández G. y R. Rangel R. *Rev. Mex. Fís.* **36** (1990) 118.
3. F.J. Duarte, "High-Power Dye Lasers", *Springer Series in Optical Sciences*, Vol. 65, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg (1991).
4. Exiton, Inc., *Laser dye catalog* (1992) 9.
5. J.R. Lankard, *Scientific American* **222**, No. 2 (1970) 24.
6. M. Villagrán M., M. Argote C. y C. Domínguez-Tagle, *Rev. Mex. Fís.* **40** (1994) 935.
7. G.M. Bilmes, H.F. Ranea-Sandoval y J.O. Tocho "Láseres de colorantes excitados por un láser de N₂", *Monografías científicas*, Vol. 3, CIOp, Argentina (1985).
8. W. Demtroder, "Laser spectroscopy", *Chemical Physics*, Vol. 5, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg (1982).
9. J. de la Rosa, R. Linares, M. Villagrán y J. Garduño, *Acta Mexicana de Ciencia y Tecnología*, **XI**, No. 41 (1993) 17.
10. M. Villagran, C. Garcia-Segundo, H.F. Ranea-Sandoval, C. Gorgoza y G.M. Bilmes, *Applied Physics B* (1995) (en prensa).
11. M.G. Littman, *Opt. Lett.* **3**, No. 4 (1978) 138.
12. S.A. Myers, *Opt. Comm.* **4** (1971) 187.
13. R. Wyatt, *Opt. Comm.* **26** (1978) 429.
14. B. Ràcz, Zs. Bor, S. Szatmári y G. Szabó, *Opt. Comm.* **36** (1981) 399.
15. VSL-Dye Laser Manual, Laser Science, Inc. (1986), 3; LD2S, Laser Photonics, Inc. (1993); 79120 Dye Laser Module, catálogo de Oriel Corp. (1994) 167.
16. C.V. Shank, A. Dienes y W.T. Silfvast, *Appl. Phys. Letters* **17** (1970) 307.