

LÁSERES ALEATORIOS

Tomás Ricardo Basile
José Alejandro Santiago
Juan Oseas López Fuentes

Laboratorio de Física contemporánea II
Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México 01000, México.

23 de noviembre de 2022

Resumen.

En este trabajo se montaron un láser de colorante y un láser aleatorio utilizando Rodamina 6G como medio activo y se midieron sus espectros de emisión, así como el espectro de fluorescencia de la Rodamina. Se obtuvo el ancho a media altura (llamado FWHM o ancho de banda) de los espectros, la longitud de onda en la que se alcanza el máximo λ_{max} y el factor de calidad. En la medida de la fluorescencia, se obtuvo como resultado $\lambda_{max} = 559.4 \pm 0.19 \text{ nm}$ y $FWHM = 37.1 \pm 0.55 \text{ nm}$, con un factor de calidad de $Q = 15.1 \pm 0.22$, mientras que para el láser de colorante se obtuvo $\lambda_{max} = 587.6 \pm 0.21$, $FWHM = 1.9 \pm 0.21$ y $Q = 305 \pm 30.9$, con lo que se observa una reducción significativa en el ancho de banda. Finalmente, se agregan partículas de SiO_2 a la Rodamina 6G para que formen un coloide y construir así un láser aleatorio. Para este láser se obtienen resultados de λ_{max} , $FWHM$ y Q para distintas intensidades del láser de bombeo y se comparan con resultados obtenidos en otra práctica de laboratorio en la que se usó un láser de bombeo con potencias más altas.

1. Introducción

Un láser es un dispositivo que utiliza el fenómeno de emisión estimulada para generar un haz de luz coherente [4]. A pesar de ser un instrumento de uso cotidiano, aun es motivo de análisis e investigación y existen varias formas distintas de construir uno. Generalmente, para la construcción de un láser se utiliza un medio activo que se excita por medio del bombeo de energía para provocar la emisión de radiación. Usualmente la emisión se mantiene confinada dentro de una cavidad resonante y con ello se induce la amplificación estimulada de radiación [4]. Esta radiación tiene la característica de ser luz coherente, que se propaga de manera unidireccional y con un espectro muy angosto.

Los láseres se encuentran en miles de aplicaciones muy variadas debido a sus propiedades características como la capacidad de alcanzar potencias muy altas, la coherencia y el espectro muy angosto. La utilidad de estas características se ha aplicado para grabar información en DVD, la comunicación por fibra óptica, cortar materiales, la investigación científica, entre otras [3].

El objetivo de la primera parte de este trabajo es construir un láser de colorante, en el cual se utiliza un colorante fluorescente como medio activo y dos espejos para formar la cavidad resonante. En particular, la finalidad de esta primera parte del trabajo es encontrar el espectro de emisión de este láser y reducir lo más posible su ancho de banda, con la meta de llevarlo a menos de 3 nm .

El objetivo de la segunda parte de este trabajo es construir un láser aleatorio y nuevamente obtener su espectro de emisión y reducir lo más posible su ancho de banda. Debido a que en el laboratorio no se cuenta con un láser de bombeo lo suficientemente potente, esta parte del proyecto se complementa con datos del espectro de emisión de un láser aleatorio construido en el laboratorio en otra ocasión con un láser de bombeo más potente.

2. Teoría

Como ya se mencionó, un láser es un dispositivo que a partir de la emisión estimulada de radiación genera un haz de luz coherente. Por ello, uno de los conceptos importantes para entender un láser es el de **coherencia**. Una fuente de luz es coherente si las ondas de luz que la componen están en fase, mantienen

esta fase en el espacio (coherencia espacial) y tiempo (coherencia temporal) y por tanto pueden interferir constructivamente [3].

Los láseres se conforman de tres componentes:

- **Medio Activo:** Es un medio material compuesto por un conjunto de átomos o moléculas que pueden llevarse a niveles excitados de energía. Por ejemplo, algunos de los láseres más comunes usan una mezcla de Helio y Neón como medio activo [3].

Los átomos o moléculas del medio activo pueden interactuar de tres formas con la radiación [2]:

- **Absorción:** El átomo o molécula absorbe la luz, lo que lo lleva a un estado de mayor energía.
- **Emisión Espontánea:** El átomo o molécula se encuentra en un estado excitado y emite luz de forma espontánea en el proceso de bajar a un estado de menor energía. La energía del fotón que emite corresponde con la diferencia de energía entre el estado excitado en el que se encontraba y el estado al que decae.
- **Emisión Estimulada:** El átomo o molécula se encuentra en un estado excitado y recibe radiación con energía correspondiente a la diferencia entre el estado excitado en el que se encuentra y el base. Tras la llegada del fotón, la molécula baja al estado base y en el proceso emite un fotón con las mismas características del fotón entrante. Los dos fotones involucrados son coherentes.

En la figura 1 se resumen estos tres procesos esquemáticamente.

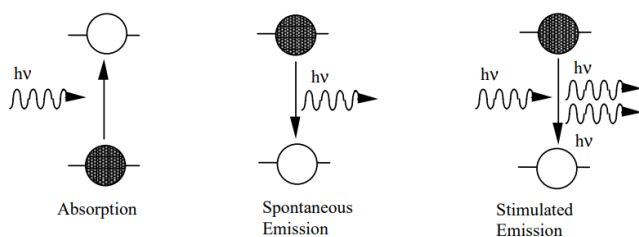


Figura 1: Esquema de los procesos de absorción, emisión espontánea y emisión estimulada. Obtenido de [4].

Inversión de Población: Para que suceda la producción láser, es fundamental que el medio activo tenga lo que se conoce como inversión de población. Se dice que hay una inversión de población en el medio activo si hay más moléculas en el estado excitado

que en el base [7]. La creación de esta inversión de población es fundamental para el funcionamiento de un láser y se logra con ayuda del siguiente componente del láser, el bombeo.

- **Fuente de Bombeo:** Se refiere al método por el cual se otorga energía al medio activo para llevar a sus átomos o moléculas a un nivel excitado y conseguir así la inversión de población [4]. Normalmente se utiliza luz de una lámpara de descarga, de otro láser o una corriente eléctrica [3].
- **Cavidad Resonante:** Es una recámara donde se mantiene circulando la luz en el medio activo el mayor número de veces posibles [4]. Una posibilidad para construir una cavidad resonante es utilizar espejos que reflejen la luz dentro de la cavidad (con uno de los espejos parcialmente transparente para que deje salir la luz del láser). El objetivo de la cavidad resonante es que se produzca emisión estimulada en la mayor cantidad posible de átomos para así amplificar la radiación creada y generar un haz coherente y además amplificar una longitud de onda específica [6].

2.1. Láser de Colorante

Un láser de colorante es un láser en el que el medio activo utilizado es un colorante en una solución líquida. Una de las ventajas principales de los láseres de colorante es la posibilidad de construir un láser ajustable, en el que se pueda variar la longitud de onda en la que opera [4]. En particular, el láser que construiremos usará como medio activo Rodamina 6G, que es un colorante orgánico y fluorescente.

Fluorescencia: Una de las propiedades características de la Rodamina 6G es la fluorescencia, que es la capacidad de una sustancia de absorber radiación y casi inmediatamente emitirla, generalmente con una longitud de onda mayor [3]. La fluorescencia sucede porque la sustancia absorbe radiación que lleva a sus moléculas a estados excitados, pero rápidamente estos estados decaen al estado base por medio de la emisión espontánea.

El espectro de emisión de una sustancia fluorescente se encuentra desplazado hacia longitudes de onda más altas (es decir, de menor energía) que el espectro de absorción, como se puede observar para los espectros de la Rodamina 6G en la figura 2. Esto se debe al fenómeno conocido como **desplazamiento de Stokes**. La diferencia de energías entre el fotón absorbido y el emitido se debe a que durante el corto tiempo que la molécula se encuentra en un estado excitado, pasa a un estado intermedio de menor energía antes de pasar al estado base por emisión espontánea [3]. Por lo tanto, no

libera en forma de radiación toda la energía que recibió, sino que pierde algo en el proceso de cambiar al nivel intermedio, la cual generalmente se dispersa en forma de vibraciones y calor.

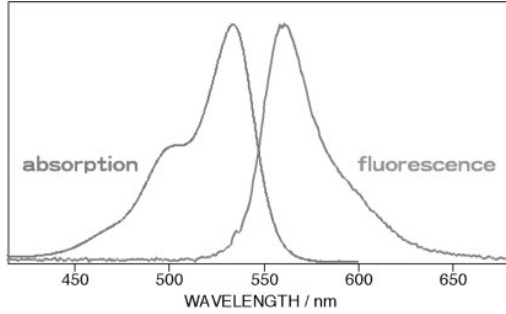


Figura 2: Espectros de absorción y emisión de la Rodamina 6G. La absorción se encuentra en la región de $500 - 560\text{nm}$ con un máximo en 530nm , mientras que la emisión se encuentra en el rango $530 - 600\text{nm}$ con el máximo en 565nm [5]. Notar que hay una región aproximadamente entre 530nm y 560nm en que los espectros de absorción y emisión se intersectan.

2.2. Láser Aleatorio

En un láser convencional, la amplificación de la luz se lleva a cabo en la cavidad resonante en donde se confina la luz [2]. Como se mencionó antes, una forma sencilla de crear esta cavidad es por medio de espejos que confinen a la luz al medio activo.

Por otra parte, en un láser aleatorio, se utiliza el concepto de **esparcimiento de luz por partículas** para mantener a la luz en el medio activo y así amplificar la radiación. El esparcimiento de luz por partículas se refiere al proceso por el cual partículas pequeñas en un medio reflejan luz entrante en varias direcciones y hacen que se disperse en el medio [3].

En un láser aleatorio se agrega un medio esparcidor al medio activo que jugará el rol de la cavidad resonante. Cuando se bombea luz coherente al medio, la luz es dispersada por el esparcidor, que hace que su camino en el medio sea largo debido a muchos rebotes aleatorios. Durante ese camino, la luz es amplificada por el medio activo y se produce luz láser [2].

Para la creación del láser aleatorio que nos interesa en este experimento, se añaden nanopartículas de Dióxido de Silicio (SiO_2) a la celda en la que se encuentra la Rodamina 6G, formando un coloide [7]. Estas partículas se encuentran distribuidas aleatoriamente en el medio y dispersan aleatoriamente a la luz entrante. Los fotones entrantes entonces siguen un camino aleatorio dentro del medio, produciendo emisión estimulada en su camino [6] y amplificando así la radiación.

Las nanopartículas de Dióxido de Silicio tienen un tamaño similar a la longitud de onda de la luz y por tanto el estudio de su dispersión se realiza con la teoría de dispersión de Mie, que considera la dispersión de luz por partículas de aproximadamente el mismo tamaño que la longitud de onda de la luz [3]. Las características como longitud de onda o ancho de banda de la luz láser producida de esta forma dependen de esta dispersión y por tanto pueden cambiar con el tamaño y la concentración de las nanopartículas en el medio [6], [1].

2.3. Características de los espectros de radiación

Finalmente, mencionaremos las propiedades que se le pueden analizar a un espectro de emisión de radiación para caracterizarlos.

- **Longitud de Onda Máxima (λ_{max}):** Es la longitud de onda en la que se encuentra el máximo de intensidad del espectro.
- **FWHM (Full Width at Half Maximum):** Es una forma de cuantificar el ancho de banda del espectro. Se toman los dos valores a los costados de λ_{max} en los que la intensidad del espectro es la mitad que en el máximo, como se ve en la figura 3 (les llamamos λ_1 y λ_2). Entonces, el FWHM se define como [2]:

$$FWHM = \lambda_2 - \lambda_1. \quad (1)$$

- **Factor de Calidad Q :** Es la razón entre la longitud de onda máxima y el ancho de banda, es decir,

$$Q = \frac{\lambda_{max}}{FWHM} \quad (2)$$

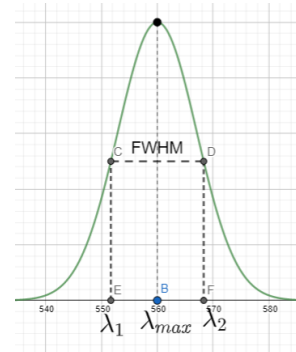


Figura 3: Ejemplo de espectro de emisión en el que se muestra λ_{max} , λ_1 , λ_2 y el $FWHM$.

3. Desarrollo Experimental

El experimento realizado se divide en 2 secciones. En la primera se construye por pasos un láser de colorante utilizando Rodamina 6G y se analiza su espectro de emisión en cada paso del proceso. En la segunda parte se utilizan partículas de Dióxido de Silicio en la muestra de Rodamina 6G para formar un láser aleatorio y se observa su espectro para distintas potencias del láser de bombeo. Además, se analizan los resultados de un experimento realizado anteriormente en el que se utilizaba un láser de bombeo más potente.

3.1. Láser de Colorante

En esta sección se crea el láser de colorante utilizando la Rodamina 6G. Los pasos realizados en esta sección del experimento son los siguientes:

1. Se coloca en la mesa de trabajo un láser Nd:YAG pulsado emitiendo en $532nm$, que sirve como fuente de bombeo.
2. Se colocan dos espejos alineados cuidadosamente de manera que redirijan el láser para que incida perpendicularmente en el frasco en el que se encuentra Rodamina 6G, que está montado sobre un soporte.
3. Se usa un espectrómetro para medir la emisión de luz de la Rodamina debido a fluorescencia. El detector se coloca muy cerca de alguna de las caras perpendiculares a la cara sobre la que incide el láser de bombeo para evitar medir el espectro de éste. Se grafica el espectro de emisión obtenido y calculan sus características (λ_{max} , $FWHM$, Q).
4. Se agrega una lente cilíndrica en la trayectoria antes de que el láser de bombeo incida sobre la Rodamina. Se posiciona la lente de tal manera que enfoque la luz en la pared del frasco y que se encuentre muy bien alineado. El montaje hasta este punto se observa en la figura 4.

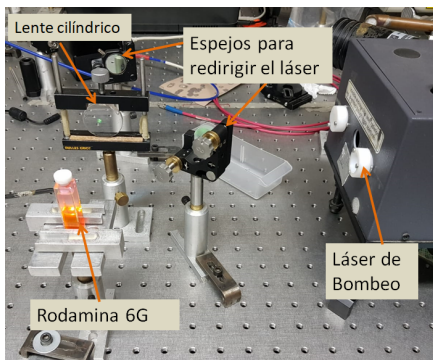


Figura 4: Montaje experimental de espejos y lente cilíndrica.

5. Se mide nuevamente el espectro de emisión.
6. Se agregan dos espejos perpendiculares a la línea que hace el láser de bombeo al incidir sobre la Rodamina. Estos espejos forman la cavidad resonante y uno de ellos debe de ser parcialmente transparente para permitir salir al haz láser. Estos espejos son colocados con mucha precisión para asegurarnos de que estén perfectamente alineados. Con ello, se completa la construcción del láser de colorante, que se muestra en la figura 5.

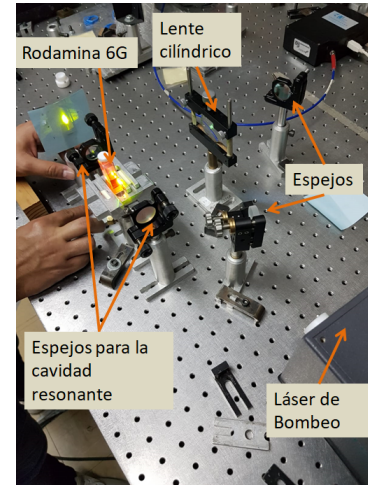


Figura 5: Montaje del láser de colorante

7. Se coloca el detector detrás del espejo parcialmente transparente de tal forma que reciba el haz de luz creado pero que no se sature. Se analiza el espectro medido por el detector y se hacen correcciones finas a los instrumentos ópticos para asegurarse de que el $FWHM$ del espectro sea lo más pequeño posible.

3.2. Láser Aleatorio

En esta sección se construye el Láser aleatorio y se analiza su espectro de emisión. Para hacerlo se siguen los siguientes pasos:

1. Se empieza con el mismo montaje completo del láser de colorante, pero ahora se agregan nanopartículas de SiO_2 a la Rodamina 6G. En este caso las nanopartículas ya se encontraban al fondo del frasco, así que sólo fue necesario agitarlo para que se dispersen y formen un coloide.
2. Se mide el espectro de emisión al igual que en el paso 7 de la sección anterior.
3. Se retira el espejo parcialmente transparente y se vuelve a medir el espectro de emisión al igual que antes.

4. Se retira el otro espejo de la cavidad y se mide nuevamente el espectro de emisión.
5. Se retira la lente cilíndrica y nuevamente se mide el espectro de emisión.
6. Se varía la potencia del láser de bombeo y se mide el espectro de emisión para cada una de las potencias.

4. Resultados

4.1. Láser de Colorante

4.1.1. Fluorescencia de la Rodamina 6G

Se presentan los resultados del paso 3 del procedimiento para la sección de láser de colorante, que consiste en medir la fluorescencia de la Rodamina 6G al incidir el láser de bombeo directamente sobre él. Se realizaron 4 medidas del espectro de emisión de la Rodamina 6G. Los resultados de las cuatro mediciones y el promedio se presentan en la figura 6.

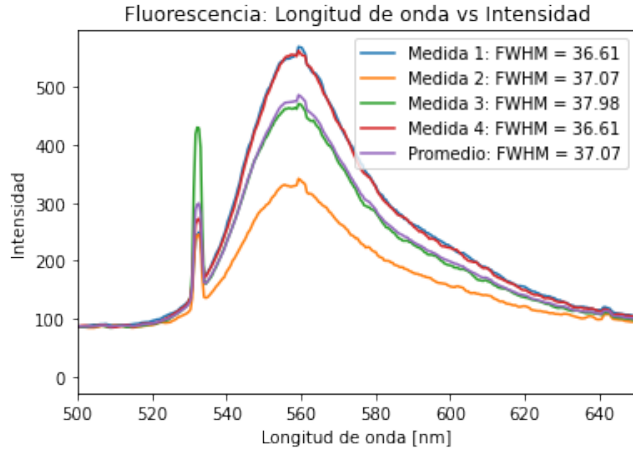


Figura 6: Espectro de emisión por fluorescencia de la Rodamina 6G en cuatro mediciones y el promedio de ellas.

Al promediar y obtener la desviación estándar del λ_{max} de las 4 medidas, el FWHM y el factor de calidad Q , se obtienen los siguientes resultados:

$$\begin{aligned}\lambda_{max} &= 559.4 \pm 0.19 \text{ nm} \\ FWHM &= 37.1 \pm 0.55 \text{ nm} \\ Q &= 15.1 \pm 0.22\end{aligned}$$

4.1.2. Espectro de emisión de Rodamina 6G usando lente

Se realizaron 5 medidas del espectro de emisión de la Rodamina 6G al apuntar el láser de bombeo hacia un lente cilíndrico que enfocaba al láser en el frasco que la

contiene, como se menciona en el paso 5 del procedimiento. Los resultados de las 5 mediciones y el promedio se presentan en la figura 7.

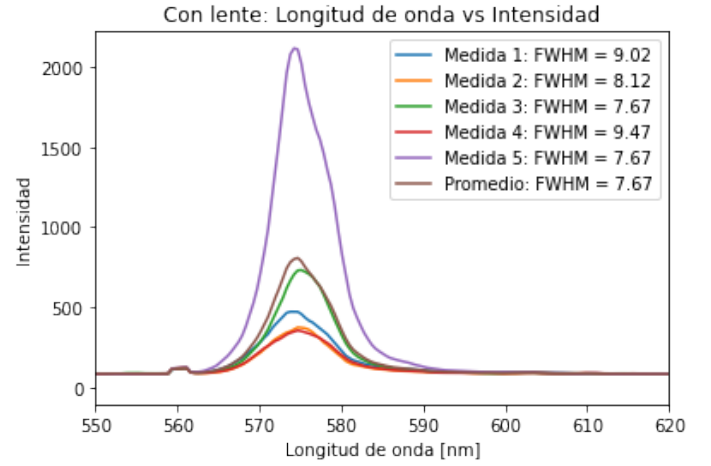


Figura 7: Espectro de emisión de la Rodamina 6G al enfocar el láser de bombeo a través de un lente cilíndrico en cinco mediciones y el promedio de ellas.

Tras promediar y obtener la desviación estándar de las 5 mediciones de λ_{max} , FWHM y Q , se obtiene:

$$\begin{aligned}\lambda_{max} &= 574.6 \pm 0.34 \text{ nm} \\ FWHM &= 8.1 \pm 0.85 \text{ nm} \\ Q &= 72 \pm 7.3\end{aligned}$$

4.1.3. Láser de colorante completo

En esta parte se analizan los resultados de emisión del láser de colorante completo, incluyendo la cavidad resonante, como se menciona en el paso 7 del procedimiento. Se realizaron 3 medidas del espectro y los resultados se muestran en la figura 8.

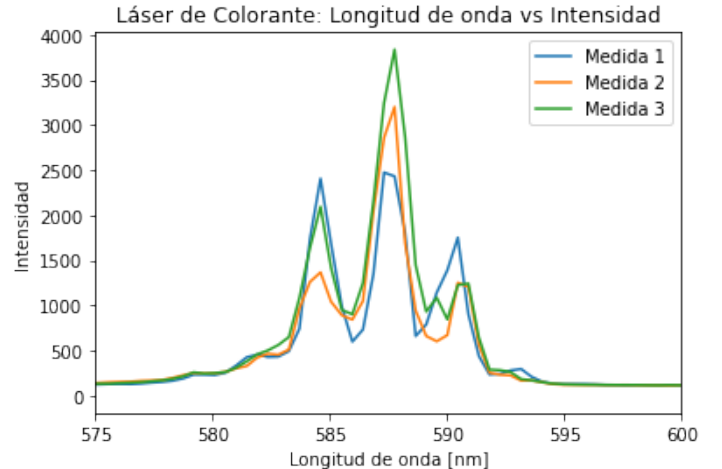


Figura 8: Espectros de emisión del láser de colorante para las 3 mediciones realizadas.

Como se observa en la gráfica anterior, el espectro de emisión ahora tiene 3 picos en lugar de 1. Por lo tanto, para el análisis de resultados, se presenta el promedio y desviación estándar de las tres medidas de λ_{max} , $FWHM$, Q para cada uno de los picos por separado. Los resultados se presentan en el cuadro 1.

Pico	$\lambda_{max}[nm]$ Promedio	$FWHM[nm]$ Promedio	Q Promedio
1	584.2 ± 0.22	2.0 ± 0.21	295 ± 26.8
2	587.6 ± 0.21	1.9 ± 0.21	305 ± 30.9
3	590.6 ± 0.21	1.5 ± 0.21	401 ± 51.6

Cuadro 1: Tabla con los promedios de λ_{max} , $FWHM$ y Q para cada uno de los picos en las 3 medidas de la emisión del láser de colorante.

4.2. Láser Aleatorio

4.2.1. Montaje Completo

Se presentan los resultados del paso 2 del procedimiento, en el que se usa la Rodamina 6G con nanopartículas de SiO_2 , la cavidad resonante que se usaba en el láser de colorante y la lente cilíndrica. En la figura 9 se muestra el espectro de emisión de las 3 medidas realizadas.

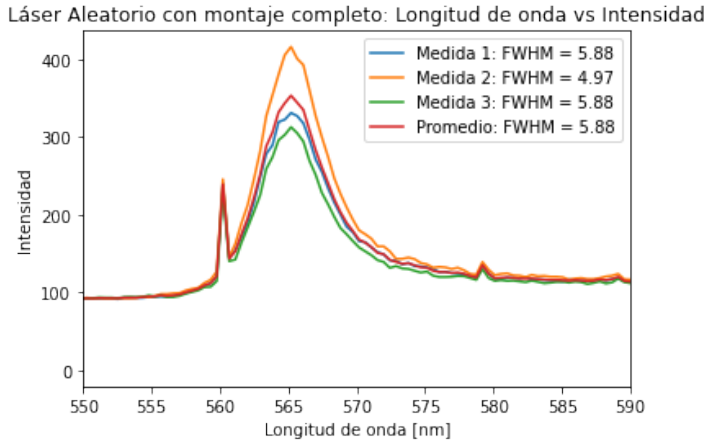


Figura 9: Espectros de emisión del láser aleatorio con el montaje experimental completo (cavidad resonante y lente cilíndrica).

El promedio y desviación estándar de las 3 medidas de λ_{max} , $FWHM$ y Q son:

$$\begin{aligned}\lambda_{max} &= 565.2 \pm 0.22 \text{ nm} \\ FWHM &= 5.58 \pm 0.43 \text{ nm} \\ Q &= 102 \pm 8.3\end{aligned}$$

4.2.2. Sin espejo parcialmente transparente

En la figura 10 se muestran los resultados de 3 mediciones del espectro de emisión de la Rodamina 6G con nano-

partículas de SiO_2 cuando se utiliza el montaje completo del láser de colorante excepto por el espejo parcialmente transparente.

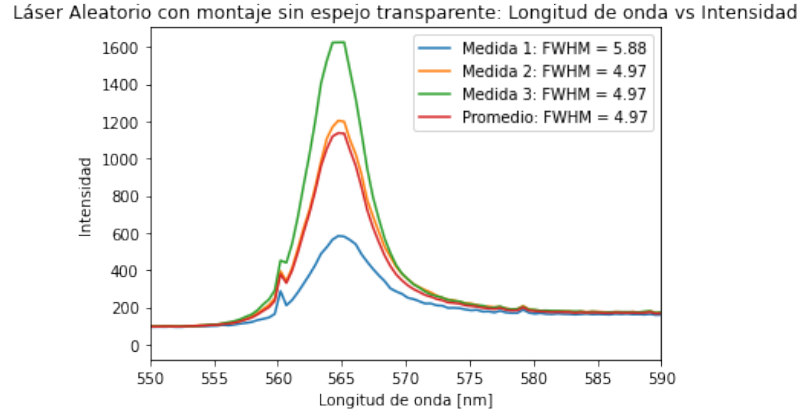


Figura 10: Espectros de emisión del láser aleatorio con el montaje experimental sin espejo parcialmente transparente.

El promedio y desviación estándar de las 3 medidas de λ_{max} , $FWHM$ y Q son:

$$\begin{aligned}\lambda_{max} &= 564.9 \pm 0.21 \text{ nm} \\ FWHM &= 5.27 \pm 0.43 \text{ nm} \\ Q &= 108 \pm 8.31\end{aligned}$$

4.2.3. Sin cavidad

En la figura 11 se muestran los resultados de 3 mediciones del espectro de emisión de la Rodamina 6G con nanopartículas de SiO_2 cuando se utiliza el montaje del láser de colorante sin la cavidad (es decir, solamente con el lente cilíndrico).

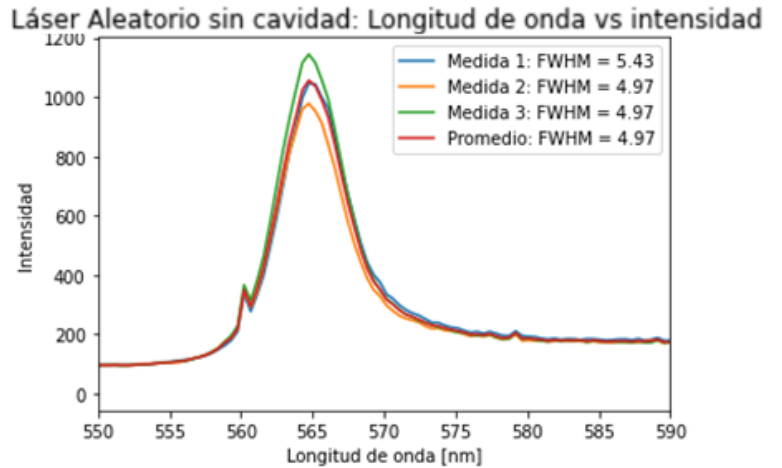


Figura 11: Espectros de emisión del láser aleatorio con el montaje experimental sin cavidad.

El promedio y desviación estándar de las 3 medidas de λ_{max} , $FWHM$ y Q para este caso son:

$$\begin{aligned}\lambda_{max} &= 564.7 \pm 0.22 \text{ nm} \\ FWHM &= 5.12 \pm 0.22 \text{ nm} \\ Q &= 110 \pm 4.54\end{aligned}$$

4.2.4. Láser Aleatorio

Finalmente, se presentan los resultados de emisión del láser aleatorio, en el que no se usa la cavidad ni el lente esférico, sino que sólo se redirige el láser hacia el frasco de Rodamina 6G y SiO_2 .

Se realizaron medidas para 5 distintas intensidades del láser de bombeo. Las intensidades están caracterizadas por los números 210, 200, 190, 180, 170, donde números menores indican mayor intensidad y representan el tiempo de retraso entre la lámpara de flash y la emisión de un pulso láser, medido en μs . Los resultados se encuentran en la figura 12.

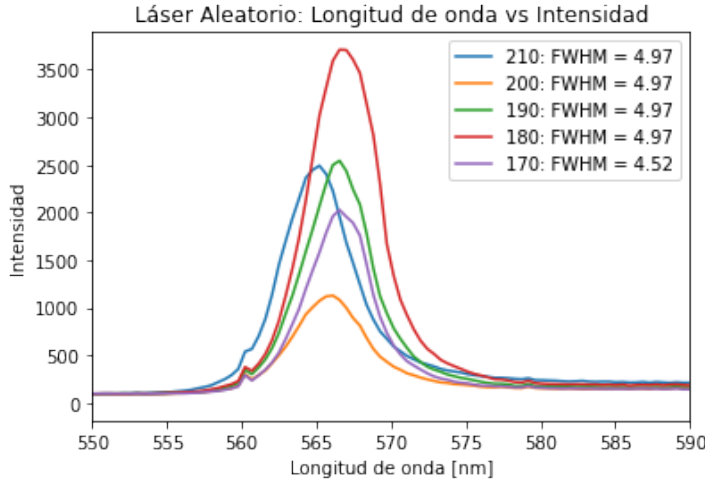


Figura 12: Espectros del láser aleatorio para distintos tiempos de retraso entre la lámpara de flash y la emisión de un pulso láser (es decir, para distintas intensidades)

4.2.5. Medidas con láser de mayor potencia

Se presentan los resultados de el espectro de emisión de un láser aleatorio en el que se usó un láser de bombeo más potente que el usado en nuestra práctica. En la figura 13 se muestran los espectros promedio de 3 medidas que se hicieron para cada una de las intensidades. Las intensidades se miden en mJ por pulso.

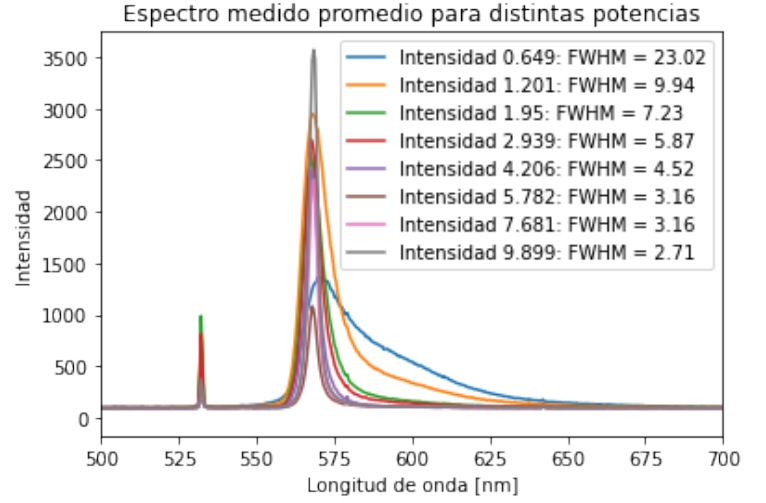


Figura 13: Espectros promediados del láser aleatorio para distintos valores de la intensidad (medida en mJ por pulso).

5. Discusión / conclusiones

5.1. Láser de Colorante

Empezamos analizando los resultados del láser de colorante. Para entender los resultados de forma más sencilla, podemos graficar los cambios de λ_{max} , $FWHM$ y Q a través de los pasos en el proceso de creación del láser de colorante. Estos cambios se presentan en las gráficas de la figura 14.

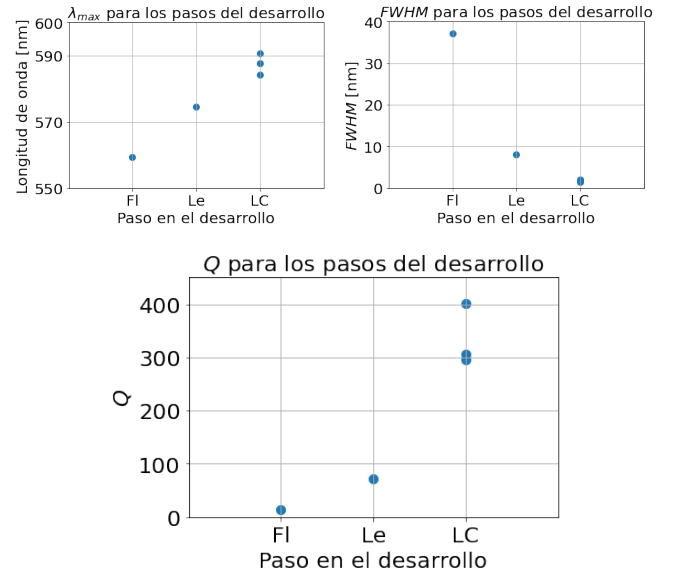


Figura 14: Resumen de los resultados de λ_{max} , $FWHM$, Q para los pasos en el desarrollo del láser de colorante. En el eje horizontal se presentan los pasos realizados, que son "FI" (para la medida de la fluorescencia de la rodamina), "Le" (para la medida con lente cilíndrico) y "LC" (para el láser de colorante, en la que se presentan los resultados de los tres picos).

Para empezar, observamos que el espectro de emisión siempre tiene su máximo λ_{max} a la derecha del máximo de absorción de la Rodamina 6G (que es de $530nm$). Como se menciona en la teoría, esto se llama corrimiento de Stokes, que se debe a la pérdida de energía de las moléculas excitadas antes de emitir un fotón y decaer al nivel base.

Además, vemos que agregar la lente cilíndrica disminuye significativamente el FWHM del espectro (y por tanto aumenta el factor de calidad Q). Esto se debe a que la lente asegura que la luz del láser de bombeo se concentre en una zona de menor tamaño y no se disperse la energía. Más aún, vemos que cuando se completa el láser de colorante con la cavidad resonante, disminuye aún más el ancho de banda (y por tanto aumenta el factor de calidad). Esto se debe a que como se menciona en la teoría, la cavidad permite la amplificación de luz de longitudes de onda específicas y entonces éstas tienen mucha más intensidad que otras.

Finalmente, notamos que al construir la cavidad, se encuentran tres picos de intensidad en la emisión en lugar de sólo uno. Esto se puede deber a que la alineación de los instrumentos ópticos no es lo suficientemente adecuada y hace que se amplifiquen otras longitudes de onda en la cavidad resonante, generando una señal emitida que no es limpia.

5.2. Láser Aleatorio

Empezamos analizando los resultados de la sección 4.2.4, en los que se encuentra el espectro de emisión del láser aleatorio creado en el laboratorio para distintas intensidades del láser de bombeo. Para ello, graficamos el cambio de λ_{max} , $FWHM$ y Q como función de la intensidad utilizada en el láser de bombeo y obtenemos las gráficas de la figura 15.

Observamos que conforme aumenta la intensidad del láser de bombeo, la longitud de onda máxima aumenta levemente, pero eventualmente llega a un tope de alrededor de $566.55nm$. Por otro lado, vemos que el ancho de banda y el factor de calidad no varían fuertemente con la intensidad del láser de bombeo excepto para la intensidad más alta, en la que el ancho de banda baja considerablemente y por tanto el factor de calidad sube.

Ahora repetimos este análisis pero para el láser aleatorio de la sección 4.2.5 que fue creado en otro experimento y con un láser de mayor potencia. Las gráficas se encuentran en la figura 16.

Observamos que se tiene un comportamiento diferente al que se observó en el laboratorio en la figura 15 con el láser menos potente. Para empezar, en estos datos la longitud de onda máxima inicia en un máximo y

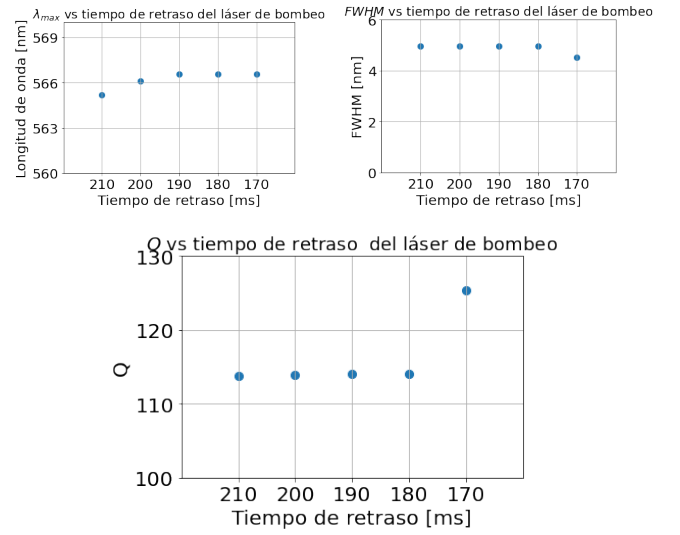


Figura 15: Cambio de λ_{max} , $FWHM$ y Q del láser aleatorio creado en el laboratorio para distintas intensidades del láser de bombeo.

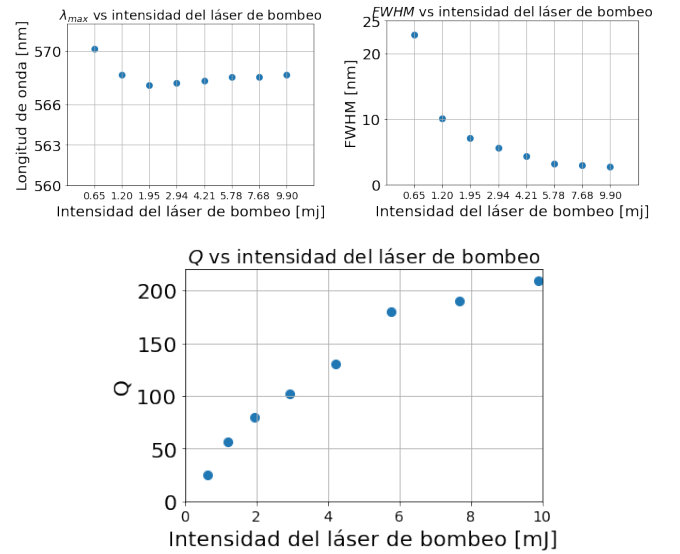


Figura 16: Cambio de λ_{max} , $FWHM$ y Q del láser aleatorio creado en otro experimento para distintas intensidades del láser de bombeo.

disminuye un poco conforme aumenta la intensidad antes de aumentar de nuevo a intensidades muy altas. Por otro lado, observamos claramente cómo disminuye el ancho de banda conforme aumenta la intensidad del láser, lo cual se debe a la mayor cantidad de energía concentrada en el medio activo. Finalmente, observamos que como consecuencia de la disminución del ancho de banda, el factor de calidad aumenta con la intensidad.

Finalmente, a partir de los resultados obtenidos para λ_{max} , $FWHM$ y Q para los distintos pasos de montaje del láser aleatorio, observamos que los parámetros obtenidos no cambian significativamente (siempre tienen un

valor aproximado de $\lambda_{max} \simeq 564.7$, $FWHM \simeq 5.2$, $Q \simeq 110$). Esto se puede explicar debido a que en el láser aleatorio no hace gran diferencia el enfoque de la luz entrante por el láser de bombeo, ya que a final de cuentas será dispersada por las partículas flotantes de SiO_2 .

Además, es importante mencionar que los espectros de emisión del láser aleatorio no cambiaban significativamente con el ángulo desde el cual se colocara el detector respecto al frasco de Rodamina. Esto se debe justamente a que en este tipo de láser se dispersa la luz aleatoriamente en el medio y entonces todas las direcciones producen el mismo espectro.

6. Conclusiones

En este experimento se estudió y construyó un láser de colorante utilizando Rodamina 6G como el medio activo, un láser de bombeo y una cavidad resonante formada por dos espejos. Se observó directamente la aplicación de conceptos teóricos como absorción, emisión estimulada, el corrimiento de Stokes, fluorescencia, entre otras.

La construcción del láser de colorante presentó dificultades, principalmente con la alineación de los instrumentos ópticos. Una mala alineación daba lugar a espectros de emisión con anchos de banda altos o con varios picos, lo cual se buscaba evitar. Esto resalta la importancia de realizar la alineación con mucho cuidado y precisión para obtener los mejores resultados posibles.

En realidad, no se lograron resultados totalmente satisfactorios de un láser de colorante, ya que se obtuvieron espectros que tenían 3 picos en lugar de solamente uno. Esto se puede deber a una mala alineación de los espejos en la cavidad o incluso a que el láser de bombeo tiene una salida de luz que no es lo suficientemente limpia. Sin embargo, se logró al menos que estos 3 picos tuvieran un ancho de banda muy bajo (de menos de $2nm$).

Se construyó un láser aleatorio utilizando nanopartículas de SiO_2 suspendidas en la Rodamina 6G. Concluyendo que para este tipo de configuración no es necesario tener una cavidad resonante para formar un láser. Además, se observó que emite el mismo espectro en todas las direcciones y que no hace diferencia enfocar el láser de bombeo con una lente cilíndrica, a diferencia del caso del láser de colorante.

Mejoras del experimento.

1.- Se requiere más tiempo para garantizar la alineación del láser y del resto de componentes del experimento para que no sufran alguna desviación y obtener resultados más precisos.

2.- Lograr mantener una potencia del láser constante, ya que al tener variaciones en la potencia es necesario ajustar las componentes para obtener datos aceptables.

3.- Utilizar un láser de bombeo más potente para obtener mejores resultados del láser aleatorio.

Referencias

- [1] A. M. Brito-Silva, e. a. (2010). Random laser action in dye solutions containing stober silica nanoparticles. *Journal of Applied Physics*.
- [2] Carmona, F. T. (2013). *Estudio angular del espectro de emisión de un láser aleatorio*. UNAM.
- [3] Hecht, E. (2017). *Optics*. Pearson Education.
- [4] PChem (2000). *An Introduction to Pulsed Dye Lasers*. PChem.
- [5] Sakai, M., Ohmori, T., and Fujii, M. (2007). Chapter 12 - two-color picosecond time-resolved infrared super-resolution microscopy. In Masuhara, H., Kawata, S., and Tokunaga, F., editors, *Nano Biophotonics*, volume 3 of *Handai Nanophotonics*, pages 189–195. Elsevier.
- [6] Wiersma, D. S. (2008). The physics and applications of random lasers. *Nature*.
- [7] Ángel Eduardo Escárvega Mendicuti (2017). *Sobre las propiedades de coherencia temporal de un láser Aleatorio*. UNAM.