Estabilización en frecuencia de láser de diodo a una línea de las moléculas de Yodo I_2

Samuel Mauricio Cruz Díaz^{*} Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. (Dated: 5 de diciembre de 2023)

En este experimento se implementan las técnicas de espectroscopía de absorción y absorción saturada en una Celda de I_2 con la doble intención de entender cómo funciona el esquema experimental empleado usualmente para sustancias monoatómicas, ahora en el caso de esta molécula, así como la caracterización y posterior estabilización en frecuencia de un láser de diodo de 650 nm. Inicialmente se verificó la curva de operación del láser tanto para la cavidad original como para la cavidad extendida (configuración de Littrow) mediante una rejilla de difracción. A continuación se variaron los parámetros de temperatura y corriente del láser hasta alcanzar una longitud de onda correspondiente a una de las transiciones del I_2 registradas en la literatura lo cual permitió observar la fluorescencia en la celda. Finalmente, utilizando un fotodiodo se encontraron curvas para de absorción y absoción satutarada para ua longitud de onda $\lambda = 654,9230nm$.

I. INTRODUCCIÓN

La estabilización en frecuencia de láseres tiene aplicaciones en áreas como la metrología y en general en la obtención de los patrones de tiempo y frecuencia. Son ampliamente conocidos los métodos y aplicaciones de la espectroscopía de absorción para átomos como el Cesio.

El camino hacia la espectroscopia láser comenzó con el desarrollo de la teoría cuántica a principios del siglo XX. En 1917, Einstein introdujo la idea de la emisión estimulada de radiación, un fenómeno clave en la creación de los láseres. Sin embargo, no fue hasta varias décadas después, en 1954, cuando Charles Townes, Arthur Schawlow y Nikolay Basov propusieron la idea del maser (amplificación de microondas por emisión estimulada de radiación), el precursor del láser.

Un avance relevante se dio en 1960 cuando Theodore Maiman construyó el primer láser funcional utilizando un cristal de rubí. Este evento marcó el comienzo de una nueva era en la óptica y la espectroscopia, abriendo un abanico de posibilidades para la manipulación de la luz con una precisión sin precedentes.

Desde entonces, la espectroscopia láser ha experimentado avances significativos. La capacidad de generar haces de luz coherente y monocromática ha permitido explorar las interacciones fundamentales entre la luz y la materia a niveles molecular y atómico. La resonancia magnética nuclear (RMN) y la espectroscopia de absorción, entre otras técnicas, se han beneficiado enormemente de las características únicas de los láseres. Para conseguir el objetivo de estabilización en frecuencia , se suelen usar, entre otros, el método de espectroscopía de absorción y el método de espectroscopía de absorción saturada. La primera técnica se emplea cuando las transiciones atomicas de interés son mucho mayores que un ancho de línea inherente a la naturaleza estadística del materia estudiado conocido como 'ancho de línea Doppler'. Para acceder a las transiciones con un ancho de línea natural se emplea el m método de absorción saturada. El esquema experimental empleado para ambas técnicas varía, pero en ambos casos el esquema general consta de tres secciones: una fuente láser, un acople de luz a la medidor de longitud de onda y el montaje de espectroscopía de absorción.

En particular las técnicas de absorción y absorción saturada han sido empleadas en forma exitosa para la estabilización en frecuencia de láseres en longitudes de onda de transición de monoatómicas como en Cesio (Ver por ejemplo [3]). Sin embargo, estas técnicas han sido menos estudiadas en el caso de compuestos como el I_2 (Ver [1]). La estabilización de láseres basadas en transiciones de sustancias moleculares tiene importantes ventajas, siendo la principal de ellas la enorme cantidad de longitudes de onda disponibles correspondientes a transiciones de energía en la molécula.

II. OBJETIVOS

a) Objetivo general.

1) Estabilizar la frecuencia de un láser de diodo a una transición electrónica de las moléculas de I2.

b) Objetivos específicos

1) Entender el funcionamiento del láser de diodo y

^{*} Correo institucional: sm.cruzd1@uniandes.edu.co

caracterizarlo.

2) Entender los montajes ópticos necesarios para implementar un esquema de estabilización en frecuencia.

3) Implementar el experimento midiendo señales de absorción y fluorescencia.

4) Entender e implementar la técnica de estabilización en frecuencia del láser diodo.

5) Implementar las técnicas estadísticas de manejo de errores para presentar los resultados experimentales obtenidos.

III. MARCO TEÓRICO

Espectroscopía de Absorción Saturada (Efecto Doppler)

Consideremos un átomo de gas se mueve en la dirección +z con velocidad v_z . Adicionalmente supongamos que el átomo interactúa óptica de frecuencia de señal ω (medida en el marco de laboratorio), donde esta onda se desplaza a una velocidad c en las direcciones +z o -z (Figura (1)). Entonces, la frecuencia aparente de la señal $\omega'(v)$ vista por el átomo en movimiento será:

$$\omega'(v) = \omega \left(1 \mp \frac{v_z}{c} \right) \tag{1}$$

Con los signos superior e inferior correspondientes a las ondas viajeras +z y -z, respectivamente.



Fígura 1. Tomado de [2]. Átomo en movimiento que interactúa con ondas en las direcciones +z y -z.

Si esta frecuencia $\omega'(v)$ percibida por el átomo se encuentra en resonancia con la frecuencia de transición no desplazada del átomo, (la cual escribiremos como $\omega_0 \equiv (E_2 - E_1)/\hbar$), entonces la frecuencia ω en el marco de laboratorio debe cumplir la condición

$$\omega'(v) = \omega\left(1 \mp \frac{v_z}{c}\right) = \omega_0$$

es decir

$$\omega = \omega_a = \frac{\omega_0}{1 \mp \frac{v_z}{c}} \tag{3}$$

(2)

La frecuencia aparente de resonancia del átomo en movimiento, denominada $\omega_a(v)$, medida en el marco de laboratorio, parece estar desplazada a uno u otro de los valores de resonancia desplazados por efecto Doppler,

$$\omega_{\rm a}(+v) = \omega_0 \left(1 - \frac{v_z}{c}\right)^1 \approx \omega_0 \left(1 + \frac{v_z}{c}\right) \tag{4}$$

o bien

$$\omega_a(-v) = \omega_0 \left(1 + \frac{v_z}{c}\right)^{-1} \approx \omega_0 \left(1 - \frac{v_z}{c}\right) \tag{5}$$

dependiendo de si la onda viaja en la dirección +z o en la dirección -z.

Esto implica que un átomo individual presenta dos frecuencias de resonancia.

Los átomos individuales en una línea ensanchada por el efecto Doppler deben ser etiquetados no por sus frecuencias de resonancia desplazadas, sino por sus valores de velocidad axial v_z . El número fraccional de átomos dN(v) con velocidad axial v está dado por la distribución de Maxwell:

$$N^{-1}dN(v) = g(v)dv = \left(2\pi\sigma_v^2\right)^{-1/2} \exp\left[-\frac{v^2}{2\sigma_v^2}\right]dv$$
(6)

Esta distribución es gaussiana, como se muestra en la Figura (2), con una desviación estándar que puede relacionarse con la masa atómica M y la temperatura cinética del gas T mediante $\frac{1}{2}M \langle v_z^2 \rangle = \frac{1}{2}M\sigma_v^2 = \frac{kT}{2}$ o $\sigma_v^2 = \frac{kT}{M}$. Esta distribución está normalizada como es habitual, de modo que

$$\int_{-\infty}^{\infty} g(v)dv = 1 \tag{7}$$



Figura 2.Tomado de [2]. Distribución gaussiana de velocidades axiales para los átomos del gas.



Figura 3. Montaje experimental. M: Espejos. HPW: Lámina de media onda. PBS: divisor de haz polarizador. BD: Trampa para haz. PD: Fotodetector.

IV. MONTAJE EXPERIMENTAL

El montaje tiene tres partes principales:

- Fuente láser.
- Acople de luz al medidor de longitud de onda.
- Montaje de espectroscopía de absorción.

La fuente de luz puesta en configuración de Littrow usando rejilla de difracción de 2400 líneas emite un haz de luz láser colimado. Dos espejos reflectores conducen el haz hacia un divisor (BS) cuyo tarea pricipal consiste en reflejar una pequeña parte del haz que a su vez incidente en una fibra óptica.

Para el montaje de espectroscopía de absorción, se usó una lámina de media onda seguida de un divisor de haz polarizador (PBS) el cual refleja y transmite parte del haz incidente dependiendo de su polarización. La parte transmitida del haz incide sobre la celda de I_2 mientras que la parte reflejada es conducida mediante un par de espejos hacia la celda en sentido inverso al haz transmitido.

Finalmente, el haz incide en un fotodetector que nos entrega una señal de voltaje directamente proporcional a la potencia incidente.

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

1) curva de operación del láser.

Inicialmente se midió la potencia emitida por la fuente para diferentes valores de corriente. La mediciones se realizaron usando un 'powermeter' tanto para la cavidad original como para la cavidad aumentada. Los datos se recogen en la siguiente tabla y la siguiente gráfica.

$I (mA) \pm 0.01 (mA)$	$P 1(mW) \pm 0.01(mW)$	$\mathbf{P2}~(\mathrm{mW})\pm0.01(\mathrm{mW})$
0,92	0,01	0,00
12,11	0,01	0,00
15,09	0,03	0,05
15,88	0,04	0,05
17,73	0,68	0,972
18,09	0,904	1,14
19,08	1,54	1,55
20,3	2,32	2,23
21,12	2,83	2,43
22,04	3,39	2,58
22,74	3,83	3,35
23,02	3,98	3,5
24,13	4,64	3,88
24,32	4,75	3,97
25,15	5,27	4,35
25,63	5,55	4,62
26,14	5,86	4,85
26,49	6,05	5,04
26,97	6,33	5,25
29,43	7,81	6,46

Cuadro I. Potencia en función de la corriente. P1: cavidad original. P2: Cavidad aumentada



Figura 4. Potencia en función de la corriente

Estos resultados son acordes a lo esperado tanto en el caso de la configuración Littrow como en el caso de de la medición de potencia en la cavidad orginal.

b) Medición del waist

A continuación se mejoró la colimación de láser variando los grados de libertad de los instrumentos ópticos dispuestos en el primer tramo del montaje y se procedió a medir el ancho del haz, más conocido como 'waist'.

Distancia	13.5%	86.5%	Diferencia
0	0.87	0.785	0.085
10	0.8495	0.757	0.0925
20	0.75	0.66	0.09
30	0.8496	0.79	0.0596
40	0.892	0.823	0.069
50	0.749	0.684	0.065
60	0.824	0.768	0.056
70	0.77	0.722	0.048

Cuadro II. Medición del Waist: Potencia (5.45), 13.5 % (4,7142), 86.5 % (0.7357).



Figura 5. Waist en función de la distancia

Estas mediciones nos indican un leve decrecimiento en el ancho del haz al aumentar la distancia respecto al punto donde iniciamos la medición.

C) Acople a fibra y obtención de fluorescencia.

A continuación se dirigió el haz hacia un Beam Splitter (BS) que reflejó cierta parte del mismo hacia un espejo (M3) y de este hacia un acoplador de fibra óptica que finalmente conducía el haz hacía el Wavelegthmeter (WLM).

El haz transmitido, por su parte, se hizo incidir en una celda de I_2 . Mediante variaciones de temperatura y corriente se consiguió llevar al láser de diodo a dos frecuencias de transición de energía para la mólecula de I2, a saber : 654.8458 nm y 654.9230 nm. En ambos casos se observó fluorecencia.



Figura 6. Celda de Yodo. λ entre valores de transición del I_2



Figura 7. Celda de Yodo. $\lambda = 654,8458$

d) Curvas de absorción y absorción saturada.

Finalmente tras hace incidir el haz trasmitido en el PBS este atraviesa la celda de I_2 y llega al fotodiodo, el cual genera una señal en el Wavelengthmeter (WLM). Para los valores de λ correspondientes a transiciones del I_2 se presenta absorción en la celda. La siguiente gráfica representa los valores de voltaje obtenidos al hacer un barrido en longitud de onda alrededor de $\lambda = 654,9230.$



Figura 8. Voltaje vs Longitud de onda para el montaje de absorción.

Finalmente, al agregar dos espejos adicionales y un Beam Dump (BD) (Ver figura 3), obtenemos el esquema de absorción saturada. De nuevo, haciendo un barrido en en longitud de onda alrededor de $\lambda = 654,9230$ se obtuvo la siguiente gráfica de Voltaje vs longitud de onda.



Figura 9. Voltaje vs Longitud de onda para el montaje de absorción saturada.

Las dos figuras anteriores nos indican que:

- Se observó un 'valle' (decaimiento) en el voltaje alrededor del valor teórico de $\lambda = 654,9230$.
- No parece haber una diferencia significativa entre las curvas obtenidas para los montajes de absorción y absorción saturada.
- Los cuatro 'valles' ubicados entre $\lambda = 654,9230$ y $\lambda = 654,9245$ no corresponden a líneas registradas

en el Atlas de transiciones de I_2 que utilizamos como referencia $\boxed{4}$.

• Si comparamos el 'ancho' estimado de los valles el cual es del orden de los 0.002 nm (el cual usando la relación $\Delta \nu = \Delta \lambda \frac{c}{\lambda^2}$ corresponde a un ancho en frecuencia de 1.38 GHz) con la resolución obtenida para el I_2 (ver figura 10 tomada de [2]) se observan al menos 4 líneas en un rango de 200 Mhz. Esto nos sugiere que nuestro montaje experimental no puede resolver líneas individuales en este rango.



Figura 10. Líneas de transición hiperfina del I₂

VI. CONCLUSIONES

Durante el transcurso del experimento se consiguió llevar al láser de diodo a dos frecuencias de transición de energía de la mólecula de I_2 , a saber : 654.8458 nm y 654.9230 nm. En ambos casos se observó experimentalmente el fenómeno de fluorescencia en la celda de Yodo tras alcanzar dichas frecuencias de transición.

El barrido en frecuencia permitió corroborar las predicciones teóricas para el I_2 al mostrar picos de transición para la segunda longitud de onda mencionada.

La información obtenida en fuentes como 2 junto con los anchos estimados para los valles de las gráficas en los casos de absorción y absorción saturada, nos indican que nuestro setup no puede resolver líneas espectrales individuales en dichos anchos.

No se consiguió estabilizar el láser por falta de tiempo. Sin embargo, el objetivo en el futuro cercano es implementar el sistema de control para dejar el láser estable en una de las frecuencias de transición mencionadas.

- Córdoba, R. and Calderón, N. (2019). Transiciones del yodo molecular i₂. Trabajo de laboratorio intermedio, 50:5710-5731.
- [2] H, S. and F, R. (2000). Absolute measurement of the hyperfine splittings of six molecular i_2 lines around wavelength at λ 633 nm. *Metrología*, 37.
- [3] Manrique, N. (2020). Estabilización en frecuencia de láser centrado en transición atómica de la línea d_2 del cesio. Universidad de los Andes.
- [4] S, G. and P, L. (1978). Atlas du spectre d'absortion de la molecule d'iode.

mour

APÉNDICE ATLAS DE TRANSICIONES DEL I2

Número de onda (cm^{-1})	Longitud de onda (nm)	Intensidad
15 329,2051	$652,\!3495$	36
15 313,9883	652,9978	32
15 311,7605	653,0928	30
15 306,6363	653,3114	29
15 295,9058	653,7697	29
15 292,1803	653,9290	36
15 290,2875	654,0099	20
15 285,1197	654,2311	18
15 278,816	654,5010	27
15 277,197	654,5703	27
15 275,2375	654,6543	23
15 274,3071	654,6942	24
15 273,5506	654,7266	22
15 272,9611	654,7519	23
15 272,6381	654,7657	23
15 272,2972	654,7803	20
15 271,5681	654,8116	20
15 271,3599	654,8205	20
15270,7695	$654,\!8458$	23
15 270,3461	654,8640	24
15 269,9015	654,8831	23
$15269,\!6559$	654,8936	31
15 269,3557	654,9065	24
15 269,1847	654,9138	26
$15269,\!1847$	$654,\!9138$	20
15268,9708	654,9230	36
15 268,6978	654,9347	22
15267,9615	$654,\!9663$	25
15 265,4205	$655,\!0753$	25
15 263,2536	655, 1683	16
15 261,9023	$655,\!2263$	15
15 260,4820	655,2873	40





Figura 10. Curva de absorción para longitudes de onda cercanas a $\lambda = 654,9230$ Tomado de [4]