



ESPECTROSCOPIA LÁSER SUBDOPPLER DEL RUBIDIO

Gustavo Rubín Linares, José A. Dávila Pintle, José Soto Manríquez

Instituto de Física B.U.A.P.

Avenida San Claudio y 18 Sur

grubin@sirio.ifuap.buap.mx, jpintle@sirio.ifuap.buap.mx, jsoto@sirio.ifuap.buap.mx

RESUMEN

En espectroscopia óptica convencional, (que utiliza espectrómetros ó interferómetros) la estructura atómica hiperfina de átomos y moléculas en gases, en general no se puede observar debido al ensanchamiento *Doppler* ocasionado por la distribución de velocidades de Maxwell de los átomos. Esto ha llevado a desarrollar poderosas técnicas espectroscópicas láser de alta resolución, que sí permiten observarlas en la medida que los efectos de este ensanchamiento son eliminados activamente por el mismo láser. Una de las primeras que se utilizaron para éste fin fue la técnica conocida como *espectroscopia de absorción saturada*, mediante detección balanceada. También se han desarrollado novedosas técnicas lock-in que presentan aspectos no lineales, como es el caso de *espectroscopia láser por fluorescencia inter modulada* las cuales son susceptibles de llevarse a niveles aún superiores en cuanto a la razón señal a ruido. En este trabajo hemos realizado experimentos con vapor de Rubidio a temperatura ambiente en la longitud de onda $\lambda=780$ nm para verificar su estructura atómica hiperfina por medio de estas dos técnicas, lo que ha exigido alcanzar una resolución del orden de 10^{-5} nm.

1. INTRODUCCIÓN

En espectroscopia láser convencional la estructura espectral atómica fina e hiperfina de átomos y moléculas frecuentemente no se pueden observar debido al ensanchamiento Doppler. Por ésta razón para tener una mejor comprensión de la estructura de la materia, se han llegado a desarrollar poderosas técnicas espectroscópicas de alta resolución que suprimen éste ensanchamiento ocasionado por la distribución de Maxwell de velocidades de átomos y moléculas en estado gaseoso. Con éstas técnicas espectroscópicas es posible verificar la estructura espectral de átomos y moléculas con una exactitud sin precedentes, ya que es posible observar la estructura hiperfina de niveles de energía en átomos a medida que el efecto *Doppler* es eliminado.

Tradicionalmente se utiliza para éste fin una técnica conocida como espectroscopia de absorción saturada mediante detección balanceada en la cual se contra propagan dos haces provenientes de un mismo láser en el

interior de una celda conteniendo vapor de Rubidio, y de ésta se logra disminuir de forma dramática los efectos del ensanchamiento Doppler [1, 2]. Variantes de ésta técnica incluyen detección lock-in tradicional, donde se modula

en intensidad el haz láser fuerte y la frecuencia de modulación se utiliza como referencia para el lock-in, con lo cual se logra aumentar la razón señal a ruido de manera muy importante [3].

También se han desarrollado novedosas técnicas lock-in que presentan aspectos no lineales, como en el caso de espectroscopia por fluorescencia intermodulada [4]. En ésta técnica los haces contra propagándose son modulados en intensidad sincrónicamente a dos diferentes frecuencias y se monitorea la fluorescencia lateral mediante un fotodetector. La señal del fotodetector es amplificada con un lock-in sincronizado a la suma de las dos frecuencias de modulación. Esta forma de utilizar el lock-in es mucho más sensible que la tradicional, ya que en éste tipo de modulación surgen nuevas combinaciones de frecuencias inexistentes en cualquier forma de contaminación, tales como reflexión, dispersión, etc. Por esta razón que esta técnica intermodulada es superior a la de absorción saturada [5].

En éste trabajo realizamos estudios de la estructura fina e hiperfina de los dos isótopos en mayor abundancia de Rubidio ^{85}Rb y ^{87}Rb en $\lambda = 780$ nm. Para este fin se implementaron las técnicas espectroscópicas láser por detección balanceada y por fluorescencia intermodulada.

Para la implementación de la técnica de fluorescencia intermodulada se diseñó y construyó un circuito generador de la suma de frecuencias de muy alta precisión para sincronizar el lock-in. Mientras que el circuito para detección balanceada es de importación y por lo tanto posee un alto grado de precisión y confiabilidad. Para obtener buenos resultados en éstos experimentos de espectroscopia libre del efecto Doppler fue necesario resolver transiciones en un rango de 10^{-5} nm.

2. CUERPO DEL TEXTO

El Rubidio es un átomo conveniente para realizar experimentos de espectroscopia, ya que en su estado base presenta una configuración de gas inerte seguida de una capa con un único electrón ($[\text{Kr}]5s$) por lo que puede



aproximarse al modelo de un solo electrón moviéndose en un potencial esféricamente simétrico, como el hidrógeno. De ésta forma se puede calcular la estructura hiperfina de niveles de energía por medio de la ecuación de *Casimir* [6, 7], lo que indica que éstas transiciones hiperfinas se encuentran alrededor de 780 nm en un rango que va desde 30 MHz a 300 MHz. Esto resulta en un problema



experimental ya que de la misma forma el ensanchamiento *Doppler* para el Rubidio teóricamente es de 550 MHz a temperatura ambiente y por lo tanto oculta la estructura hiperfina. Esto se soluciona experimentalmente utilizando técnicas espectroscópicas en las cuales se suprimen los efectos del ensanchamiento *Doppler* el cual presenta una forma de línea *gaussiana* para el coeficiente de absorción [8, 9, 10, 11]. El fundamento teórico de estas técnicas se basa principalmente en contra propagar dos haces provenientes de un mismo láser en el interior de una celda conteniendo la muestra donde aparecen fenómenos como el *hole burning* y *lamb dip* los cuales dan como resultado que el coeficiente de absorción tome una forma *lorentziana* la cual se relaciona con la estructura hiperfina. La figura 1 presenta el arreglo experimental para espectroscopia de absorción saturada mediante detección balanceada. Un haz principal proveniente de un láser sintonizable alrededor de 780 nm se divide en dos en tres, dos de ellos cruzan paralelamente la celda que contiene Rb y el tercero que es mucho mas fuerte y se denomina de bombeo se alinea para propagarse en dirección opuesta con el haz de señal en el interior de la celda. Con éste arreglo se pueden hacer mediciones de la absorción libre del efecto *Doppler*

a los armónicos de éstas frecuencias. Lo expresado anteriormente implica el uso de un amplificador lock-in

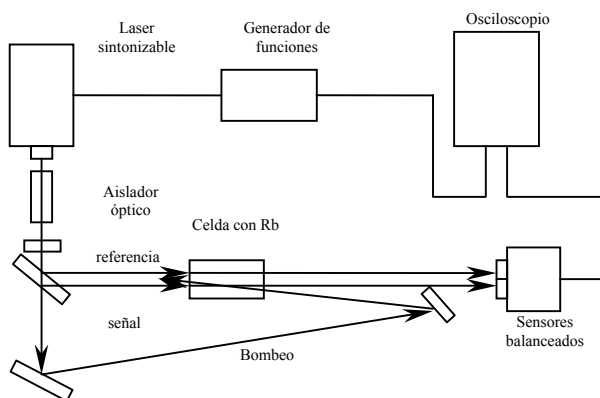
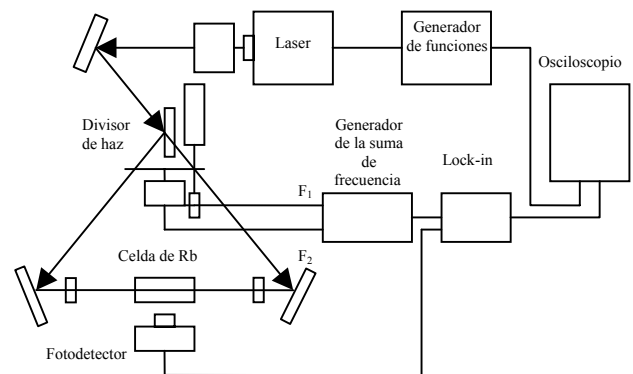


Fig. 1 Arreglo experimental para absorción saturada



En lugar de medir directamente la atenuación del haz de prueba, la absorción puede ser monitoreada lateralmente por medio de la fluorescencia inducida por el láser la cual es proporcional a la potencia del láser absorbida por la muestra [9, 11, 12].

Consiste básicamente como se muestra en la figura 2, en dos haces modulados sincrónicamente en intensidad a diferentes frecuencias los cuales se propagan en direcciones opuestas en el interior de una celda conteniendo vapor de Rubidio. Esto ocasiona de acuerdo al teorema de Fourier para señales periódicas, que la intensidad de la fluorescencia contenga términos a las frecuencias de modulación de los campos presentes, a la suma y diferencia de éstas frecuencias y también términos

para seleccionar de entre tantas combinaciones la frecuencia que presente la estructura hiperfina del Rubidio. El término que contiene esta información es aquel que involucra los dos haces contra propagándose, el cual se puede desarrollar como sigue [12]:

$$\begin{aligned}
 I_1(t)I_2(t) &= \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_{1n} \exp(jnf_1t) \right\} \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_{2m} \exp(jmf_2t) \right\} \\
 &= C_{10}C_{20} + C_{10}C_{21} \exp(jf_2t) + C_{11}C_{21} \exp[j(f_1 + f_2)t] + \\
 &\quad + C_{11}C_{22} \exp[j(f_1 + 2f_2)t] + C_{11}C_{20} \exp(jf_1t) + C_{11}C_{21} \exp[j(f_1 - f_2)t] + \\
 &\quad + C_{11}C_{22} \exp[j(f_1 - 2f_2)t] + \dots
 \end{aligned}$$

En esta última ecuación mostramos sólo algunos de los términos del producto $I_1(t)I_2(t)$, el desarrollo completo incluye todas las combinaciones de las frecuencias de modulación f_1 y f_2 . Sin embargo, la información acerca del pico de Lamb el cual está relacionado con la estructura hiperfina, se encuentra en los términos a las frecuencias $f_1 + f_2$, $f_1 - f_2$ y sus armónicos, ya que éstos representan la interacción simultánea de las moléculas con ambos campos propagándose.

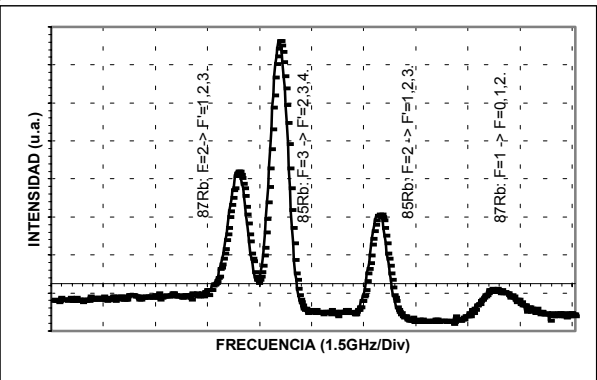


Fig. 3. Estructura fina del Rubidio obtenido por fluorescencia

Los resultados para la estructura hiperfina por las dos frecuencias espectroscópicas se muestran en las figuras 4 y 5 para el caso de ^{87}Rb , que corresponde al pico más pequeño que se observa en el extremo derecho de la figura 3. Es decir, bajo este pico en la figura 3 se encuentran los picos de las figuras 4 y 5 que corresponden a la estructura hiperfina.

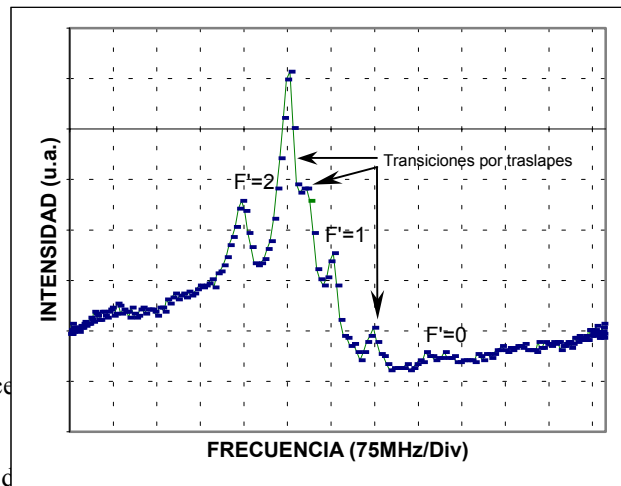


Fig. 2. Arreglo experimental para fluorescencia intermodulada

En la figura 3 se presenta la estructura fina de los isótopos de Rubidio obtenidas por fluorescencia intermodulada para la cual simplemente se bloquea uno de los haces contra propagándose.

Fig. 4. Transición $F=1 \rightarrow F'=0,1,2$ de ^{87}Rb obtenido por detección balanceada

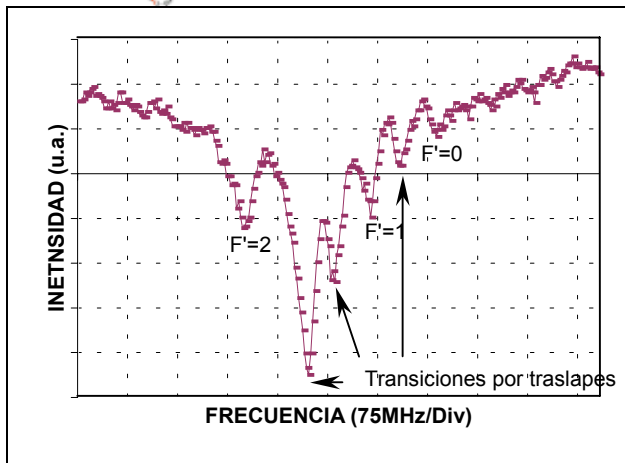


Fig. 5. Transición $F=1 \rightarrow F'=0,1,2$ de ^{87}Rb obtenido por FIM

Comparando los gráficos de las figuras 4 y 5 podemos notar que los picos correspondientes $F'=0$ y una de las transiciones por intercrucamiento no se pueden identificar claramente en el caso de absorción saturada mientras que en el de fluorescencia se distinguen perfectamente.

3. CONCLUSIONES

Las técnicas espectroscópicas presentadas aquí nos permiten realizar estudios de la estructura fina e hiperfina de la materia. Sin embargo, la técnica por fluorescencia

presenta mejores resultados que la técnica por absorción, debido a la intermodulación de los dos haces involucrados en la fluorescencia.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] K. B. MacAdam, A. Steinbach, & C. Wieman, A narrow-band tunable diode laser system with grating feedback, and a saturated absorption spectrometer for Cs and Rb, *Am. J. Phys.* 60 (12), 1992, 1098-1111
- [2] Daryl W. Preston, Doppler-free saturated absorption: Laser spectroscopy, *Am. J. Phys.*, 64(11), 1996, 1432-1436.
- [3] Theodor W. Hänsch, High-resolution spectroscopy of atoms and molecules, *Physics Today*, 34, 1977, 34-43.
- [4] M. S. Sorem & A. L. Schawlow, Saturation spectroscopy of molecular iodine by intermodulated fluorescence, *Optics Communications*, 5(3), 1972, 148-151
- Wolfgang E. Ernst, Doppler-free polarization spectroscopy of diatomic molecules in flame reactions, *Optics Communications*, 44(3), 1983, 159-164.
- [6] G. N. Rao, M. N. Reddy, & E. Hecht, Atomic hyperfine structure studies using temperature/current tuning of diode lasers: An ungraduate experiment, *Am. J. Phys.*, 66(8), 1998, 702-711.
- [7] Bruce W. Shore & Donald H. Menzel, *Principles atomic spectra*(New York: John Wiley & Sons Inc., 1968).
- [8] Igor I. Sobelman, *Atomic spectra & radiative transitions* (Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag, 1979).
- [9] K. Shimoda, *High-resolution laser spectroscopy*(Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1976).
- [10] V. S. Letokhov, V. P. Chebotayev, *Nonlinear laser spectroscopy*(Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1977).
- [11] Marc D. Levenson, Satoru S. Kano, *Introduction to nonlinear laser spectroscopy*(San Diego, California: Academic Press, Inc., 1988).
- [12] W. Demtröder, *Laser spectroscopy*(Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1988).