

ESPECTROSCOPIA DE LA LÍNEA D₂ DEL RUBIDIO MEDIANTE UN DIODO LÁSER REALIMENTADO CON CAVIDAD EXTERNA

RUBIDIUM D₂ LINE SPECTROSCOPY WITH AN EXTERNAL CAVITY DIODE LASER

M. Luda^{a,b}, J. Codnia^b, M. L. Azcárate^{b,c,*}

a Departamento de Física, FCE y N, UBA
Pabellón 1, Ciudad Universitaria (1428) – Buenos Aires - Argentina
b Departamento de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones DEILAP (CITEDEF-CONICET)
Juan Bautista de La Salle 4397 - (B1603ALO) – Villa Martelli – Prov. Buenos Aires - Argentina
c Carrera del investigador de CONICET

Recibido:08/11/13; aceptado: 31/07/14

En este trabajo se detalla el armado de un láser sintonizable por realimentación con cavidad externa y su utilización para realizar espectroscopia de ultra alta resolución de la estructura hiperfina del Rubidio. El láser consistió en un diodo de grabadora de CD realimentado con una red de difracción en condición Littrow con selectividad en la frecuencia de emisión por variaciones del ángulo de la red y la corriente de alimentación y la temperatura del diodo. El montaje permitió sintonizar modos de emisión de hasta 4 nm alrededor de la longitud de onda típica del diodo, de 780 nm, lo que incluye los 780,24 nm de la transición Rb $5^2P_{3/2} \leftarrow 5^2S_{1/2}$. Se utilizó la variación simultánea y sincronizada de la corriente y del ángulo de la red para obtener barridos continuos en frecuencia de hasta 20 pm de extensión, lo que permitió obtener el espectro de absorción completo dentro del límite Doppler. Se identificaron las líneas correspondientes a las dos variedades isotópicas (^{85}Rb y ^{87}Rb) y se corroboró la efectividad del dispositivo comparando los resultados con los valores reportados en la literatura de la composición isotópica de abundancia natural y del espectro.

Palabras clave: Diodos láser, cavidad externa, Rubidio.

An external cavity diode laser was implemented for determining the ultra high resolution spectroscopy of the hyperfine structure of Rubidium. The laser consisted of a CDRW diode with feedback from a diffraction grating on Littrow configuration, with frequency selectivity through grating angle and diode current and temperature variation. The assemblage enabled frequency tuning of about 4 nm around the typical diode frequency, of 780 nm, including the 780.24 nm line of the Rb $5^2P_{3/2} \leftarrow 5^2S_{1/2}$ transition. With simultaneous and synchronized variation of the current and grating angle, scanning of 20 pm could be achieved, enough to obtain the complete absorption spectrum of the transition on the Doppler limit. The spectral lines of both isotopic varieties (^{85}Rb y ^{87}Rb) were identified and the setup was tested comparing the results with the values reported in the literature of Rb natural abundance composition and spectrum.

Keywords: Laser Diode, external cavity, Rubidium.

I. INTRODUCCIÓN

Un diodo láser realimentado con una red de difracción en condición Littrow¹⁻⁴ es una fuente versátil de luz de alta coherencia³ con frecuencia sintonizable a través de la variación del ángulo de la red, la corriente de alimentación y el control de la temperatura. Estos dispositivos, mayormente denominados por sus siglas en inglés ECDL (External Cavity Diode Laser), revisten de gran importancia debido a que su implementación en las últimas décadas permitió el desarrollo de técnicas láser indispensables actualmente en los laboratorios de cuántica y física atómica que trabajan en temas que incluyen el enfriamiento láser⁵, la manipulación de qubits en estados electrónicos y la generación de patrones de frecuencia de ultra alta precisión⁶, entre otros.

En este trabajo se describirá el armado un ECDL para la realización de espectroscopia de absorción de ultra-

alta resolución^{1,7-9}. La técnica consiste en irradiar una muestra gaseosa con un haz que realiza un barrido en frecuencia y detectar las variaciones de la transmitancia de la misma. De esta manera pueden determinarse las bandas de absorción asociadas a estados electrónicos y/o vibro-rotacionales de los componentes de la muestra y, a partir de éstas identificar y cuantificar los componentes atómicos y moleculares presentes. Con el armado presentado se logró medir el espectro de la transición D₂ del Rb^{7,10}, identificando parte de la estructura hiperfina en el límite del ensanchamiento Doppler.

Se explicará primero la construcción del dispositivo⁴, haciendo hincapié en los principios de la técnica de sintonización del ECDL y la forma de realizar barridos extensos en frecuencia, para luego describir concretamente el experimento realizado. Finalmente, se presentará la comparación de los datos obtenidos para el Rb

* e-mail: marceluda@gmail.com, jcodnia@citedef.gob.ar.

con los valores reportados en la literatura⁷ para corroborar la efectividad de la técnica.

El láser sintonizable

La frecuencia de emisión de un láser depende de la curva de ganancia del medio activo y de las pérdidas impuestas sobre cada frecuencia por la cavidad. Normalmente un diodo láser emite en una frecuencia cercana al máximo de la curva de ganancia compatible con alguno de los modos de resonancia de la cavidad de un resonador Fabry-Perot (FP) equivalente. Reinyectando el primer orden de una red de difracción dentro del diodo (condición de Littrow) se puede construir un ECDL que agrega selectividad a la frecuencia de emisión a través de varios parámetros.

La cavidad efectiva del ECDL puede modelarse como una doble cavidad FP acoplada (Fig. 1). Los valores de reflectividad de las superficies semi-espejadas son invariantes y dependen del cambio de índice de refracción entre el diodo y el aire, de la existencia de un recubrimiento antireflex a la salida del diodo y de la eficiencia de la red para una dada polarización y una longitud de onda determinada. Los tamaños de las cavidades son variables. La longitud efectiva de la cavidad interna cambia con la temperatura, por el cambio de índice de refracción y por la dilatación térmica, que a la vez es afectada por la corriente de alimentación. La cavidad externa tiene una longitud que depende del ángulo de la red y del punto de pivote.

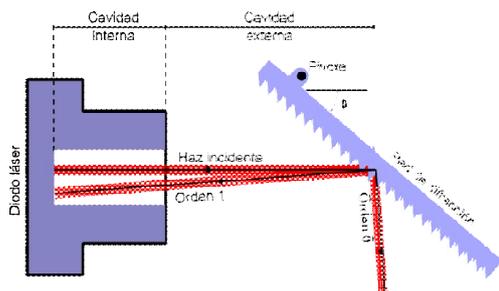


Figura 1. Esquema de un ECDL con realimentación Littrow.

El máximo de la curva de ganancia se desplaza linealmente con la corriente de alimentación. La reinyección del primer orden de la red de difracción permite favorecer otras frecuencias de la curva de ganancia, que dependen del ángulo de la red.

El cálculo completo de los modos resonantes de la doble cavidad tiene varios términos¹¹, pero se puede aproximar como la multiplicación de los espectros de transmitancia de las cavidades FP equivalentes (Fig. 2). Al variar el ángulo de la red se produce una variación en el rango espectral libre de la cavidad externa y, por ende, un desplazamiento de sus modos de resonancia (negro). Cuando el desplazamiento del modo que está emitiendo supera la mitad de un rango espectral libre de la cavidad externa se produce un salto de modo⁸, que corresponde a un cambio en el número de onda resonante, lo que impone un límite al máximo desplazamiento en frecuencia que se puede realizar en forma continua.

Para superar este límite se deben variar de forma sincronizada los modos resonantes de las cavidades

interna y externa⁹. En este trabajo se varió la longitud efectiva de la cavidad interna con la corriente de alimentación. De esta forma se logró extender el barrido lo suficiente como para capturar el espectro completo de la línea D₂ del Rb. Para ello hubo que caracterizar de forma precisa el diodo láser en operación libre y realimentada y sincronizar adecuadamente el control de la corriente y del ángulo de la red.

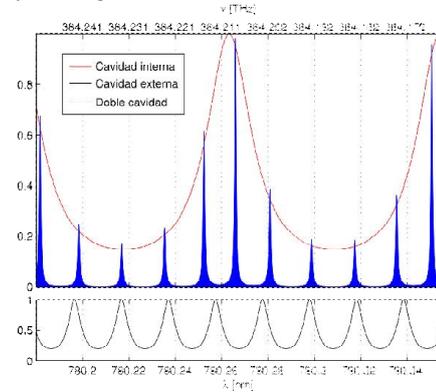


Figura 2. Simulación de la cavidad doble realizada en Matlab.

Construcción del ECDL

El ECDL se construyó a partir de un diodo láser de AlGaAs de grabadora de CD (~780 nm, 10 mW) realimentado con una red de difracción de 1800 l/mm (Fig. 3). Se utilizó una lente esférica con $f=8\text{mm}$ para colimar el haz. El montaje de la red poseía control de los ángulos azimutal y polar a través de tornillos micrométricos, lo que permitía la alineación gruesa, útil para entrar en condición de Littrow. Para realizar barridos angulares con paso fino se utilizó un transductor piezoeléctrico (PZT), Thorlabs PZT actuator AE0203D04F, montado en el punto de apoyo del tornillo correspondiente al ángulo polar, que permitía desplazamientos de hasta $3\ \mu\text{m}$.

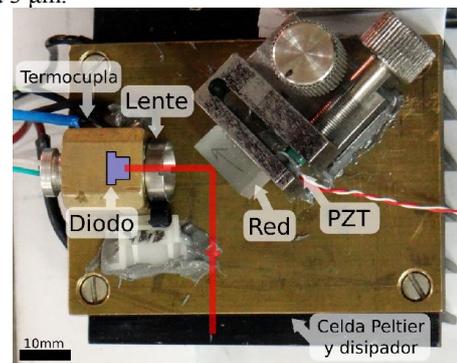


Figura 3. Foto-esquema del ECDL.

Debajo de la base se colocó una celda Peltier con un disipador para tener control sobre la temperatura. Se utilizó una estructura de cartón pluma para encapsular y estabilizar térmicamente el dispositivo completo. Como alimentación del diodo se utilizó una fuente de corriente variable, Wavelength Electronics FL500 Laser Diode Driver, controlable mediante una tensión VSET.

II. CARACTERIZACIÓN DEL ECDL

Diodo en operación libre

Se midió el espectro del diodo en operación libre con un analizador de espectros para láser, HighFinesse, LSA. Para valores de corriente cercanos al umbral de emisión se puede apreciar la curva de ganancia del medio activo así como el peine de frecuencias debido a la cavidad interna (Fig. 4). Se midió un rango espectral libre de $47,2 \pm 0,1$ GHz, lo que implica una longitud de cavidad de 856 ± 2 μm para el valor $n\text{AlGaAs}=3,7$.

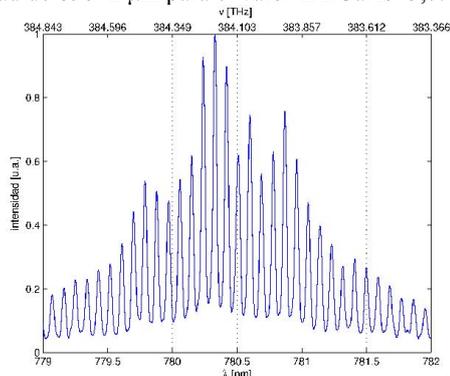


Figura 4. Espectro del diodo operando cerca del umbral.

En la Fig. 5 se muestran las mediciones realizadas de la tasa de variación de la frecuencia en función de la temperatura ($\Delta\nu/\Delta T = -30 \pm 3$ GHz/ $^{\circ}\text{C}$) y de la corriente ($\Delta\nu/\Delta I = 1,183 \pm 0,004$ GHz/ mA), registradas con el analizador de espectros.

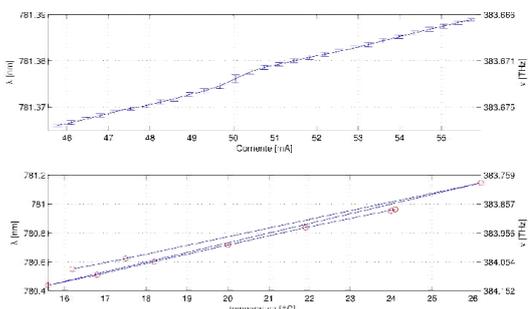


Figura 5. Caracterización de la frecuencia de emisión para el diodo libre en función de la corriente y la temperatura.

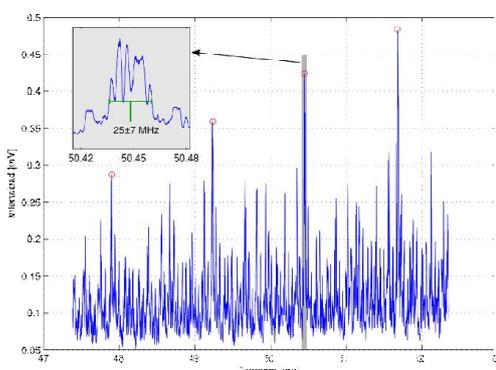


Figura 6. Medición del ancho de línea del diodo láser con un interferómetro Fabry-Perot.

Para analizar el ancho de línea de emisión se realizó un barrido en corriente y se adquirió el espectro de

transmisión a través de un interferómetro Fabry-Perot de alta fineza ($F=340$) con un rango espectral libre de $1,5$ GHz construido específicamente para ello. Se identificaron los picos de transmisión y se midió un ancho de línea de 25 ± 7 MHz. El valor $\Delta\nu/\Delta I = -1,19 \pm 0,06$ GHz/ mA hallado permitió corroborar la medición anterior.

Diodo con cavidad externa

Se montó la red en condición Littrow y se comprobó que con el tornillo micrométrico del montaje se podían sintonizar frecuencias de casi toda la curva de ganancia del diodo. Sin embargo, la variación de frecuencia resultó ser bastante inestable al utilizar este control manual, produciendo saltos de modo en diferentes direcciones de hasta algunos nanómetros de magnitud. Para probar el ECDL en paso fino se utilizó el PZT conectado a un generador de funciones y se monitoreó con el analizador de espectros la frecuencia de emisión para los diferentes valores de tensión aplicados.

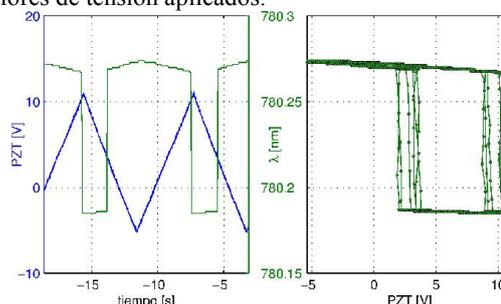


Figura 7. Variación de la longitud de onda en función de la tensión aplicada sobre el PZT. Se pueden apreciar los saltos de modo producidos al realizar una variación continua de la tensión.

Se alcanzó un camino libre de saltos de modos máximo de 8 pm, equivalente a $3,9$ GHz. Se obtuvo el valor para la variación de la frecuencia en función de la tensión aplicada al PZT: $\Delta\nu/\Delta V = 0,295 \pm 0,005$ GHz/V.

Con los datos obtenidos se ajustaron los parámetros de control de la corriente y del PZT para que realicen barridos con un mismo $\Delta\nu/\Delta t$. Variando simultáneamente ambos parámetros se pudo extender el barrido continuo en frecuencia hasta los 20 pm.

III. ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN DEL RUBIDIO

La técnica de barrido de frecuencia fue utilizada para medir el espectro de absorción del Rb en el régimen no saturado. La línea D_2 corresponde a la transición $5^2P_{3/2} \leftarrow 5^2S_{1/2}$ del $\text{Rb}^{7,10}$ en $780,24$ nm, longitud de onda incluida dentro del rango alcanzable con el ECDL construido.

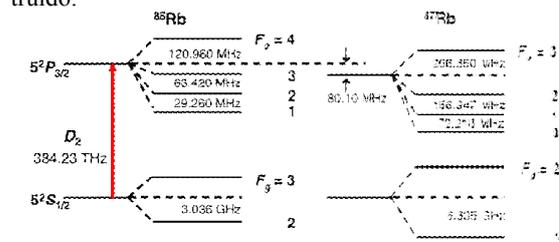


Figura 8. Estructura hiperfina del 87Rb y 85Rb (ref. 7).

Se utilizó una celda con Rb en abundancia natural (28% ^{87}Rb - 72% ^{85}Rb)⁷, Triad Technology Inc. TT-RB-75-V-x, con densidad en estado gaseoso determinada por la presión de vapor para la temperatura ambiente, de aproximadamente 25°C. Para esa temperatura el ensanchamiento Doppler calculado es de 500 MHz, por lo que las transiciones hiperfinas de ambos isótopos correspondientes al desdoblamiento de los estados fundamentales pueden resolverse (Fig. 8). El ancho de línea medido para el diodo está muy por debajo de estas magnitudes, por lo que el ECDL debería poder registrar con precisión el espectro.

Mediante un separador de haz el haz se separó en uno de monitoreo, registrado como referencia de longitud de onda a través del analizador de espectros y otro de sondeo. El haz de sondeo fue atenuado con un dispositivo tipo Malus, que además fijaba una polarización lineal, y se lo utilizó para irradiar la celda. La transmitancia fue relevada con un fotodiodo.

La fluencia de saturación del Rb para estas condiciones⁷ es de 16 $\mu\text{W}/\text{mm}^2$ por lo que se utilizó un haz de sondeo de 5 $\mu\text{W}/\text{mm}^2$. Para alcanzar la longitud de onda adecuada se utilizó primero el tornillo micrométrico, buscando alcanzar los 780 nm. Luego se utilizó el control de temperatura para corregir la longitud de onda en el orden de decenas de picómetros. Finalmente, se realizaron varios barridos variando simultáneamente la corriente del diodo y la tensión del PZT. En la Fig. 9 se muestra una de las capturas del espectro del Rb sin procesar.

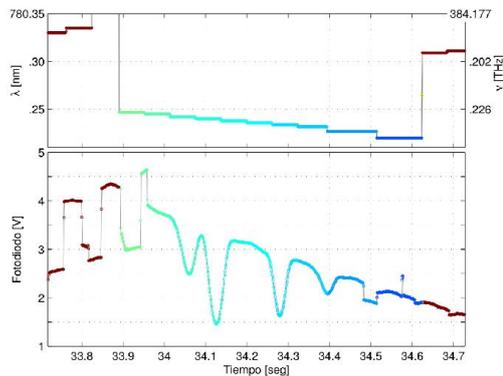


Figura 9. Arriba, longitud de onda registrada por el analizador de espectros. Abajo, transmitancia de la celda con Rb.

Análisis de resultados

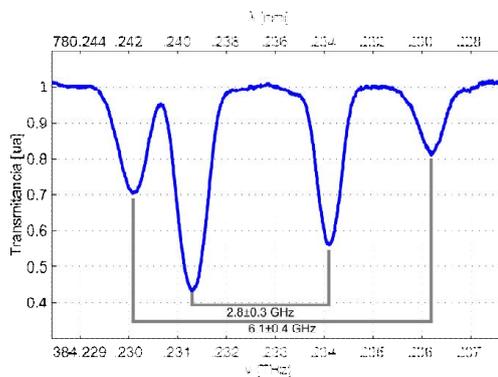


Figura 10. Transmitancia de la celda con Rb normalizada

En la Fig. 10 se puede ver el espectro de la Fig. 9 normalizado respecto de la potencia del láser, para eliminar la pendiente impuesta por la variación lineal de la corriente. Utilizando la ley de Beer-Lambert, la transmitancia de la celda debe tener la forma $T=I/I_0=\exp(-\alpha L)$, donde I_0 e I son las intensidades incidente y transmitida, respectivamente, α es proporcional a la densidad de átomos n y a la sección eficaz σ , que a su vez depende de v . Ajustando αL con una función gaussiana, impuesta por el ensanchamiento Doppler, se calcularon las frecuencias de las transiciones para cada isótopo y las composiciones relativas de cada uno y se las comparó con los datos de la referencia 7 como se muestra en la Tabla 1.

TABLA 1: COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE FRECUENCIA Y DE COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DEL RUBIDIO

	Valor calculado	Valor referencia 7
$D_2 \text{ } ^{85}\text{Rb}$	2,8±0,3 GHz	3,036 GHz
$D_2 \text{ } ^{87}\text{Rb}$	6,1±0,4 GHz	6,835 GHz
$[^{85}\text{Rb}]$	72,4±1,9 %	72,17 %
$[^{87}\text{Rb}]$	27,6±1,9 %	27,83 %

IV. CONCLUSIONES

La excelente correspondencia hallada corrobora la utilidad del ECDL construido para la realización de la espectroscopia de absorción del Rb. La técnica es aplicable a otras muestras atómicas y transiciones electrónicas en otras longitudes de onda seleccionando diodos láser de las frecuencias adecuadas. Los resultados abren la posibilidad de extender la experiencia actual para construir un patrón de frecuencia, realizar el seguimiento de la concentración de un dado componente en un proceso químico o industrial y realizar mediciones no invasivas de composición isotópica de muestras gaseosas.

V. REFERENCIAS

- 1 - MacAdam, K.B. et al. Am. J. Phys., 60(12), 1098-1111, (1992)
- 2 - Ricci, L. et al. Opt. Commun., 117(5-6), 541-549, (1995)
- 3 - Saliba, S.D. et al. Appl. Opt., 48(36), 6961-6966, (2009)
- 4 - Barabas, F., Petrunger G., et al. Anales AFA, 22(1), 63-66, (2012)
- 5 - Mellish, A.S. et al. Am. J. Phys., 70(9), 965-971, (2002)
- 6 - Tetu, M. et al. CPEM '90 Digest., Conference on, 248-249, (1990).
- 7 - Siddons, P. et al. J. Phys. B, 41(15), 155004, (2008)
- 8 - Führer, T. et al. Opt. Lett., 33(4), 372-374 (2008)
- 9 - Dutta, S. et al. Appl. Phys. B, 106(3), 629-633, (2012)
- 10 - Steck, D.A. Rubidium 87 D Line <http://steck.us/alkalidata/rubidium87numbers.pdf>
- 11 - van de Stadt, H. et al. J. Opt. Soc. Am. A, 2(8), (1985)