ESTABILIZACIÓN EN FRECUENCIA DE LÁSERES USANDO ESPECTROSCOPIA DE BOMBEO ÓPTICO Y SU APLICACIÓN EN LOS PATRONES PRIMARIOS DE FRECUENCIA

Eduardo de Carlos López, J. Mauricio López Romero, Sergio López López División de Tiempo y Frecuencia, CENAM km 4,5 Carretera a los Cués, el Marqués Qro., C. P. 76241, México Teléfono ++52 442 2110500 ext. 3205, fax ++52 442 2110548, e-mail edlopez@cenam.mx

Resumen: Se presenta un método novedoso para la estabilización en frecuencia de láseres semiconductores y su aplicación en los patrones primarios de frecuencia. Este método se basa en la espectroscopia de bombeo óptico con dos haces en copropagación sintonizados a diferentes frecuencias. Se muestran los resultados obtenidos en la estabilización en frecuencia de un diodo láser usando esta técnica en vapor de ¹³³Cs, encontrándose que los valores de la estabilidad en frecuencia para este láser coinciden en partes en 10¹¹ respecto a la estabilidad encontrada con el método tradicional de FM. Con el objeto de comparar el desempeño de esta nueva técnica respecto a las técnicas tradicionales de estabilización, en el caso particular de la operación de relojes atómicos, se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de un láser estabilizado por este método para la obtención del espectro de Ramsey en el patrón primario de frecuencia de haz térmico con bombeo óptico, el CsOP-1.

1. INTRODUCCIÓN

En algunas aplicaciones científicas y tecnológicas, es necesario contar con más de un láser estabilizado en frecuencia. Un ejemplo particular de estas aplicaciones se encuentra en la Metrología de Tiempo y Frecuencia, en donde la manipulación de los estados cuánticos del átomo de ¹³³Cs con luz láser se realiza de manera habitual, tanto en los patrones primarios de frecuencia de haz térmico con bombeo óptico, como en las fuentes atómicas, cuya componente principal son las Trampas Magneto-Ópticas [1, 2]. En ambos casos, se requiere por lo menos de un par de láseres estabilizados en frecuencia a distintas resonancias correspondientes a la línea D₂ del átomo de ¹³³Cs.

En el presente trabajo se aborda un nuevo método para la estabilización de láseres semiconductores utilizando dos haces de frecuencia distinta en copropagación y espectroscopia de bombeo óptico. En contraste con los resultados obtenidos utilizando espectroscopia de saturación, los espectros obtenidos con esta técnica carecen del llamado pozo Doppler, así como de transiciones ficticias (*crossover line*) [3, 4]. Algunos trabajos han sido reportados en este mismo contexto [5, 6], sin embargo no ha sido reportado su empleo en la estabilización de láseres.

En esta nueva técnica se utiliza un haz de prueba proveniente de un láser estabilizado en frecuencia por la técnica de espectroscopia de frecuencia modulada (FM), en conjunto con un haz de bombeo proveniente de un segundo láser, el cual emite, en principio, a una frecuencia distinta al primer láser. De este modo, la luz transmitida del láser de prueba es detectada y sus variaciones en frecuencia son aprovechadas para generar la señal tipo dispersión con la cual se estabiliza el láser de bombeo. Se presentan las señales tipo dispersión generadas con el método de espectroscopia de bombeo óptico con haces en copropagación en ¹³³Cs, así como su empleo en la estabilización en frecuencia de un diodo láser. Se muestran los resultados del análisis de estabilidad relativa entre los láseres de bombeo y de prueba respecto a un tercer láser, encontrándose valores de estabilidad equivalentes. Finalmente se exponen la aplicación de estos láseres así estabilizados en la obtención del espectro de Ramsey del patrón primario de frecuencia de haz térmico con bombeo óptico del CENAM, el CsOP-1 [1, 2].

2. ESPECTROSCOPIA DE BOMBEO ÓPTICO CON HACES EN COPROPAGACIÓN

Un esquema de este método se muestra en la figura 1. Esta técnica es similar al empleado en la espectroscopia de saturación [3, 4], no obstante en haces este caso los utilizados no son de necesariamente la misma frecuencia. Considérese la interacción de estos haces con vapor de ¹³³Cs, en donde se despreciarán los subniveles Zeeman así como la polarización de los haces. Supóngase que la frecuencia del haz de prueba, ω_{P} , se encuentra fija a una de las frecuencias de resonancia, ω_{FF} , de la línea D₂, mientras que la frecuencia del el haz de bombeo, $\omega_{\rm B}$, puede ser sintonizada a cualquiera de las frecuencias de resonancia de esta misma línea (figura 2). Bajo estas condiciones, sólo la población de átomos que se mueven en un plano perpendicular a la dirección de propagación de los haces tienen una contribución significativa en la obtención de los espectros (lamb dips), de forma similar a los espectros obtenidos por espectroscopia de saturación. Sin embargo, para este esquema, la variación en la intensidad transmitida del haz de prueba sólo es función de la frecuencia del láser de bombeo, $\omega_{\rm B}$.



Fig. 1 Diagrama esquemático de la técnica de espectroscopia de bombeo óptico con haces en copropagación.

Combinando distintos valores de frecuencia en la emisión de los láseres se puede obtener ya sea un incremento o una disminución en la intensidad transmitida del haz de prueba. Un ejemplo particular de este proceso se describe a continuación. Considérese el caso en que la frecuencia del láser de prueba coincide con la frecuencia de resonancia correspondiente a la transición $|F = 4\rangle \rightarrow |F = 5\rangle$ ($\omega_P = \omega_{45}$), tal y como se ilustra en la figura 2. Bajo esta

condición, se pueden encontrar tres casos particulares.

i) Cuando el láser de bombeo emite en una de las frecuencias asociadas a las transiciones $|F = 4\rangle \rightarrow$ $|F = 3,4,5\rangle$ ($\omega_B = \omega_{45}, \omega_{44}, \omega_{43}$). En este caso la intensidad transmitida del haz de prueba se incrementa, ya que el haz de bombeo disminuye la población de estados en el nivel F = 4 y el haz de prueba interacciona con muy pocos átomos que se encuentran en ese nivel (figura 2(*a*)).

ii) La frecuencia del láser de bombeo corresponde a alguna de las frecuencias asociadas a las transiciones $|F=3\rangle \rightarrow |F=3,4\rangle$ ($\omega_B = \omega_{33}, \omega_{34}$). Para este caso habrá una disminución de la

intensidad transmitida, debido a que la población del nivel F = 4 es aumentado por el bombeo óptico. De esta forma el haz de prueba tiene la oportunidad de interaccionar con una mayor población de átomos que se encuentran en este nivel (figura 2(*b*)).

iii) Para el caso particular en que la frecuencia del láser de bombeo sea igual a la frecuencia asociada a la transición cíclica $|F=3\rangle \rightarrow |F=2\rangle$ ($\omega_B = \omega_{32}$), la intensidad transmitida del haz de prueba se mantiene sin cambios, ya que en estas circunstancias la población en el nivel F = 4 se mantiene constante.



Fig. 2 Procesos de saturación y bombeo óptico. Los círculos negros representan un incremento en la población de átomos en ese estado, mientras que los círculos blancos representan una disminución de la población. (a) Cuando el láser de bombeo emite en las frecuencias de resonancia ω_{45} , ω_{44} , ω_{43} . (b) Para el caso en que la frecuencia del láser de bombeo es ω_{34} , ω_{33} , ω_{32} .

3. GENERACIÓN DE SEÑALES TIPO DISPERSIÓN

Una de las técnicas más utilizadas para la generación de señales de error es la espectroscopia de FM [3, 4], la cual consiste en modular la frecuencia del láser, $\omega(t)$, alrededor de una cierta frecuencia ω ', de manera que:

$$\omega(t) = \omega' + A_{\omega} \operatorname{sen}(\omega_{\mathrm{m}} t), \qquad (1)$$

donde A_{ω} es la profundidad de modulación y ω_m es la frecuencia de modulación. Si la profundidad de

modulación es mucho menor que el ancho de línea de los espectros, la intensidad transmitida del haz de prueba, S(t), puede aproximarse como:

$$S(t) = S(\omega') + \frac{d}{d\omega} S(\omega)|_{\omega = \omega'} A_{\omega} \operatorname{sen}(\omega_{\mathrm{m}} t) .$$
 (2)

Multiplicando la intensidad transmitida dada en la ecuación anterior por la señal modulante $Bsen(\omega_m t + \varphi)$, siendo *B* la amplitud de esta señal y φ un corrimiento en fase, y eliminando los términos oscilatorios (ej. usando un filtro paso bajo), se tiene que la señal de error es:

Paso_bajo
$$[S(t)Bsen(\omega_m t + \varphi)] =$$

 $\frac{1}{2}A_{\omega}Bcos(\varphi)\frac{d}{d\omega}S(\omega)|_{\omega=\omega}$. (3)

Se observa en la ecuación (3) que la amplitud de la señal tipo dispersión es máxima cuando el corrimiento en fase, φ , es 0 o 180 grados. Asimismo esta señal será totalmente atenuada cuando φ adquiera los valores de 90° o 270°.

En el experimento aquí descrito se usaron dos láseres semiconductores tipo DBR (YOKOGAWA, modelo YL85XTW), con una potencia máxima de 5 mW, los cuales emiten a una longitud de onda cercana a la línea D₂ del Cesio (aproximadamente 852 nm), con una dispersión en frecuencia de 1 MHz [3, 4]. La potencia de los haces de prueba y bombeo fueron, 30 μ W y 120 μ W, respectivamente, estando linealmente polarizados. Para la estabilización del láser de prueba se empleó una celda cúbica con gas de Cesio (1 cm \times 3 cm \times 1 cm), mientras que para la espectroscopia de bombeo óptico se utilizó una celda cilíndrica (2.5 cm de diámetro por 2.5 cm de longitud). Ambas ampolletas fueron mantenidas a una temperatura de 23 °C y una presión de vapor del orden de 10⁻⁶ torrs. En la figura 3 se observa el arreglo experimental que se utilizó en la generación de las señales tipo dispersión.

El láser de prueba se estabilizó a la frecuencia correspondiente a la transición $|F=4\rangle \rightarrow |F=5\rangle$ del Cesio, utilizando espectroscopia de FM, donde la señal de error se generó usando una frecuencia de modulación de 130 kHz y una profundidad de modulación del orden de 500 kHz, de manera que se llegara a la condición $\varphi = 0^{\circ}$. A su vez la frecuencia del láser de bombeo se moduló linealmente con una señal triangular de 100 Hz y

una amplitud de modulación del orden de 1 GHz. Lo anterior se hizo con el afán de hacer un barrido en frecuencia a través de las transiciones hiperfinas y así poder generar los espectros. En la figura 3 se observa que la luz proveniente del láser de prueba, el cual está modulado en frecuencia, es aprovechada para generar la señal de error con la cual se estabiliza el láser de bombeo. Estas señales son mostradas en la figura 4.



Fig. 3 Arreglo experimental para la generación de señales tipo dispersión utilizando espectroscopia de bombeo óptico con haces en copropagación. Donde DH es un divisor de haz, FD es un fotodetector, A es un amplificador, AD es un amplificador diferencial y FPB es un filtro paso bajo.

4. ESTABILIDAD

Las frecuencias, tanto del láser de bombeo como del láser de prueba, fueron comparadas con la frecuencia de un tercer láser (láser de referencia).

Este último con características de emisión similares que los dos primeros. Este láser se estabilizó en frecuencia del mismo modo que el láser de prueba (espectroscopia de FM). Para ello se empleó la línea ficticia (crossover line) que se encuentra a la mitad de las transiciones $|F = 4\rangle \rightarrow |F = 5\rangle$ y $|F=4\rangle \rightarrow |F=4\rangle$. Asimismo el láser de bombeo se estabilizó a la frecuencia de resonancia ω_{44} (figura 4(a)). Se realizó un batido de frecuencia entre cada láseres durante un periodo par de de aproximadamente 20 horas, con un tiempo de adquisición de 3 segundos [7].



Fig. 4 Señales tipo dispersión empleando la espectroscopia de bombeo óptico con haces en copropagación para la línea D_2 del ¹³³Cs. (a) La frecuencia del láser de bombeo se modula alrededor de las frecuencias de resonancia ω_{43} , ω_{44} , ω_{45} . (b) La frecuencia del láser de bombeo es modulada alrededor de las frecuencias de resonancia ω_{32} , ω_{33} , ω_{34} .

Los resultados del análisis de estabilidad relativa aplicado a las diferencias de frecuencia entre par de láseres se muestran en la figura 5. Nótese que las estabilidades relativas entre el láser de prueba vs láser de bombeo y el láser de referencia vs láser de bombeo son muy similares, mientras que la estabilidad relativa entre el láser de prueba vs láser de referencia es mejor. De esta manera se puede inferir que el láser de bombeo es el que más aporta inestabilidades a las mediciones.



Fig. 5 Varianza de Allan correspondiente a las diferencias de frecuencia entre pares de láseres.

El ruido que presenta la frecuencia del láser de bombeo se debe a una desviación entre el haz de bombeo y el haz de prueba, esto debido a que el ángulo formado entre estos dos haces no es exactamente cero, induciendo así un corrimiento en frecuencia debido al efecto Doppler [3]. Se estima que para 1 grado en el ángulo formado entre los haces se tiene un corrimiento del orden de 2 MHz. Las trayectorias que recorren los haces de prueba y de bombeo (figura 3) en este experimento en particular, son más largas que la utilizada en la espectroscopia de saturación, por lo que las variaciones de temperatura, así como las vibraciones, afectan de manera más significativa a la alineación en este caso.

A modo de comparar los resultados obtenidos en este trabajo con los resultados de otros grupos, en la tabla 1 se muestra la estabilidad reportada para un láser semiconductor de cavidad extendida de 1560 nm doblado en frecuencia, publicado por A. Bruner *et al* [8], así como la estabilidad de un láser semiconductor de cavidad extendida de 852 nm, reportados por Y. T. Zhao *et al* [9].

Tipo de láser	Método de	Estabilidad reportada				Referencia
	estabilización	3 s	1 min	10 min	1 h	
Semiconductor de cavidad extendida, 1560 nm	Doblado en frecuencia, espectroscopia de FM en ⁸⁷ Rb, tercera derivada	2 × 10 ⁻¹¹	1.5 × 10 ⁻¹¹	-	-	A. Bruner <i>et al</i> [8]
Semiconductor de cavidad extendida, 852 nm	Espectroscopia de FM en ¹³³ Cs, tercera derivada	5 × 10 ⁻¹⁰	1.1 × 10 ⁻¹⁰	6 × 10 ⁻¹¹	-	Y. T. Zhao <i>et al</i> [9]
Semiconductor DBR, 852 nm	Espectroscopia de bombeo óptico en ¹³³ Cs, primera derivada	1.2 × 10 ⁻¹⁰	3.8 × 10 ⁻¹¹	3 × 10 ⁻¹¹	9 × 10 ⁻¹¹	Este trabajo
Semiconductor DBR, 852 nm	Espectroscopia de FM en ¹³³ Cs, primera derivada	6.3 × 10 ⁻¹¹	1.9 × 10 ⁻¹¹	1.6 × 10 ⁻¹¹	3.5 × 10 ⁻¹¹	Este trabajo

Tabla 1 Comparación de los resultados publicados por A. Bruner el al [8] y Y. T. Zhao [9] con los resultados obtenidos en este trabajo.

5. OBTENCIÓN DEL ESPECTRO DE RAMSEY EN EL CsOP-1

A continuación se presenta el espectro de Ramsey generado con el patrón primario de frecuencia de haz térmico con bombeo óptico, desarrollado en la División de Tiempo y Frecuencia del Centro Nacional de Metrología, el CsOP-1 [1, 2]. Este espectro se obtuvo empleando los láseres semiconductores estabilizados descritos en este trabajo. El láser de prueba se estabilizó a la frecuencia de resonancia ω_{45} del ¹³³Cs, el cual se utilizó como haz de detección en el reloj de haz térmico, mientras que el láser de bombeo se estabilizó a la frecuencia de resonancia ω_{44} .

En la figura 5 se observa el espectro de Ramsey así obtenido. Éste es el resultado de realizar un barrido en la frecuencia de las microondas alrededor de 9.192631770 GHz, donde el pico central correspondiente a la transición $|6^2 s_{1/2}, F = 3, m_F = 0\rangle \rightarrow |6^2 s_{1/2}, F = 4, m_F = 0\rangle$ es

empleada para la estabilización de las microondas. El ancho de línea es del orden de 1 kHz, y el cociente señal a ruido es aproximadamente 600.



Fig. 6 Espectro de Ramsey obtenido con el reloj atómico de Cesio CsOP- 1 utilizando un láser semiconductor estabilizado con la técnica de espectroscopia de bombeo óptico con haces en copropagación.

6. CONCLUSIONES

Se presentó un nuevo método para la estabilización de en frecuencia de láseres semiconductores utilizando espectroscopia de bombeo óptico con haces en copropagación en ¹³³Cs. En esta técnica se utiliza un haz de prueba proveniente de un láser estabilizado por la técnica de espectroscopia de FM,

mientras que el haz de de bombeo es generado por un segundo láser, el cual emite a una frecuencia distinta al primero. Los espectros obtenidos de esta manera tienen la particularidad de carecer de transiciones ficticias (crossover line), así como de pozo Doppler, en comparación con los espectros que se obtienen con la espectroscopia de saturación. Las señales tipo dispersión con las cuales se estabiliza el láser de bombeo son generadas aprovechando la modulación en frecuencia del láser de prueba, de forma similar a lo que se realiza en la espectroscopia de FM. De esta manera el láser de bombeo se encuentra libre de modulación. Se encontró que la estabilidad en frecuencia del láser de bombeo coincide en partes en 10¹¹ respecto a la estabilidad encontrada para los láseres estabilizados con el método tradicional de espectroscopia de FM. Esta ligera discrepancia de partes en 10¹¹ radica principalmente en la sensibilidad que tiene el arreglo experimental a los cambios de temperatura y a las vibraciones, debido a las distancias que tienen que recorrer los haces. Reducir estas distancias, así como mejorar el control de la temperatura en los laboratorios, implicaría un incremento en la estabilidad del láser de bombeo, teniendo como límite las estabilidades encontradas en los láseres estabilizados con espectroscopia de saturación. Se estima que en los meses siguientes a la conclusión de este trabajo se realice la implementación de estas mejoras.

REFERENCIAS

- [1] S. López, J. M. López, I. Domínguez, E. de Carlos, H. Ramírez, Evaluación de alta exactitud de errores sistemáticos en espectroscopia de niveles hiperfinos del Cs-133, Superficies y Vacío, Vol. 15, 2002, 1.
- [2] J. M. López, I. Domínguez, S. López, E. de Carlos, H. Ramírez, Manipulación de átomos con luz y sus aplicaciones en Metrología, Superficies y Vacío, Vol. 13, 2001, 97.
- [3] E. de Carlos, J. M. López, High resolution spectroscopy in gases and its application on the frequency stabilization of semiconductor lasers, Revista Mexicana de Física, Vol. 50, 2004, 569.
- [4] E. de Carlos, J. M. López, Estabilización en frecuencia de láseres semiconductores y su aplicación en la metrología de tiempo y frecuencia, Memorias del Simposio de Metrología 2004.
- [5] S. J. Park, H. S. Lee, H. Cho, J. D. Park, Velocity – Selective – Optical – Pumping Spectroscopy of the ⁸⁷Rb D₂ Line by Using Two Copropagating Laser Beams, Journal of the

Korean Physical Society, Vol. 33, No. 3, 1998, 281.

- [6] A. Banerjee, V. Natarajan, Saturated-absorption spectroscopy: eliminating crossover resonances by use of copropagating beams, Optics Letters, Vol. 28, No. 20, 2003, 1912.
- [7] E. de Carlos, J. M. López, Frequency stability estimation of semiconductor lasers using the "three cornered hat" method, Memorias del V Simposio la Óptica en la Industria, 2005.
- [8] A. Bruner, V. Mahal, I. Kiryuschev, A. Arie, M.A. Arbore, M. M. Fejer, Frequency stability at the kilohertz level of a rubidium-locked diode laser at 192.114 THz, Applied Optics, Vol. 37, No. 27, 1998, 6410.
- [9] Y. T. Zhao, J. M. Zhao, T. Huang, L. T. Xiao, S. T. Jia, Frequency stabilization of an externalcavity diode laser with a thin Cs vapour cell, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 37, 2004, 1316.