

# CONSTRUCCION DE UN LÁSER ESTABILIZADO EN FRECUENCIA POR EL MÉTODO DE DOS MODOS LONGITUDINALES

Miguel A. Luna Vargas, Héctor A. Castillo Matadamas  
Centro Nacional de Metrología

Km 4.5 carr. a Los Cués, Mpio. El Marqués Qro.

Tel 01 (442) 2110500 al 04 ext. 3283 y 3281, e-mail: [mluna@cenam.com](mailto:mluna@cenam.com), [hcastill@cenam.mx](mailto:hcastill@cenam.mx)

**Resumen:** Se ha desarrollado una cabeza láser estabilizada en frecuencia emitiendo a 633 nm. El esquema de control utilizado es el de dos modos longitudinales con corrección de temperatura para estabilizar la frecuencia. El sistema es capaz de seleccionar entre dos modos longitudinales; esta característica permite discriminar dos frecuencias (se tiene una cabeza láser bicolor con diferencia de frecuencias de 1090 MHz). La estabilidad en frecuencia alcanzada es de  $3 \times 10^{-10}$  para 1000 segundos; que es ligeramente superior a la estabilidad de una cabeza láser comercial y la potencia útil del haz  $\approx 0,5$  mW aproximadamente.

## 1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de fuentes láser estabilizadas en frecuencia para mediciones interferométricas continúa en aumento para mediciones de alta exactitud en el ámbito de la metrología dimensional e inclusive son utilizadas como patrones de longitud en la definición del metro [1]. Los sistemas interferométricos comerciales siguen siendo muy costosos y son sistemas cerrados sin acceso por parte del usuario a algunas de sus características tales como tecnología y parámetros de funcionamiento.

Teniendo como fin la investigación metrológica y el desarrollo de sistemas interferométricos patrón usados para calibrar sistemas interferométricos comerciales, es necesario tener acceso e información de todas las fuentes de incertidumbre de estos sistemas. Por lo cual es muy conveniente la construcción de fuentes láser estabilizadas para poder desarrollar métodos de calibración de sistemas interferométricos e inclusive incorporarlos a sistemas interferométricos de medición en el CENAM.

El método de estabilización por medio de dos modos longitudinales ha sido revisado anteriormente por varios autores para láseres HeNe de diferentes longitudes de onda. Algunos de estos trabajos utilizan actuadores directamente sobre el tubo láser aprovechando la expansión térmica del tubo obteniendo estabilidad en el orden de  $5 \times 10^{-10}$  [2].

Los esquemas para la detección de los modos longitudinales tienen algunas variantes de acuerdo al tipo de sensor utilizado (fotocelda o fotodiodo) y al arreglo óptico para la separación de los modos [3].

Sin embargo la estabilidad a largo periodo alcanzada así como lo sencillo y robusto del método lo hacen adecuado para la construcción de fuentes láser para uso en interferometría con estabilidad anual en el orden de  $10^{-8}$ [4].

## 2. DESARROLLO

El método de estabilización por dos modos longitudinales, usa la diferencia de intensidad luminosa entre los modos adyacentes de luz láser linealmente polarizados y ortogonales entre si, con lo anterior se puede obtener la señal de error del sistema de control.

El principio básico de este método depende de las fluctuaciones de amplitud y frecuencia de los láseres de gas He-Ne, las cuales son atribuidas a variaciones en la longitud de la cavidad resonante del láser debido a la expansión térmica del tubo de vidrio. La expansión y contracción térmica causan que la frecuencia de resonancia de la cavidad se desplace a través de la curva de ganancia del láser y a su vez produce cambios de intensidad y frecuencia en su salida.

La variación de la frecuencia del láser en función de la longitud de la cavidad resonante, para el caso en el que no se considera penetración del campo electromagnético en las superficies de los espejos, se puede aproximar de la siguiente forma:

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad \text{o} \quad L = n \cdot \frac{c}{2\nu} \quad (1)$$

Donde, L representa la longitud del resonador,  $\lambda$  la longitud de onda dentro de la cavidad, c la velocidad

de la luz,  $\nu$  la frecuencia de la luz generada y  $n$  es un número entero (numero de orden). Por consiguiente cada modo longitudinal esta definido por un valor diferente de  $n$  para el mismo valor de la longitud  $L$ . La frecuencia óptica del haz puede ser obtenida de la ecuación 1.

$$\nu(n) = n \cdot \frac{c}{2L} \quad (2)$$

De tal forma que la diferencia de frecuencia entre dos modos longitudinales adyacentes (aquellos donde  $n_2 = n_1 \pm 1$ ) se obtiene como sigue:

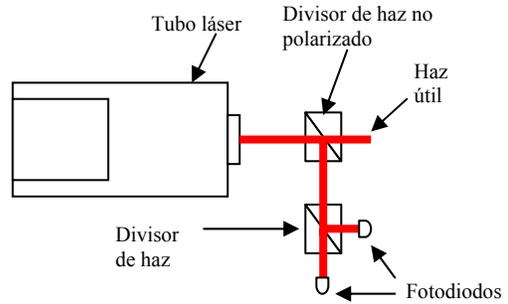
$$n_2 - n_1 = 1 = \frac{2L}{c} (\nu_2 - \nu_1) = \frac{2L}{c} \Delta\nu \quad (3)$$

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L} \quad (4)$$

Para una longitud de cavidad resonante de  $L=178$  mm, (tubo láser utilizado), la distancia entre dos modos adyacentes ó ancho espectral libre es de 1090 MHz. De tal forma que es altamente probable que en la cavidad resonante solo exista 1 ó a lo más dos modos longitudinales adyacentes. De esta forma el control electrónico debe expandir térmicamente la cavidad hasta obtener una región adecuada de operación con dos modos presentes a fin de obtener la señal de error para hacer correcciones en forma continua.

En el esquema de control propuesto, se utiliza el haz principal del tubo láser para la señal de corrección y para la salida del haz útil. El esquema también utiliza dos divisores de haz, uno no polarizado y el otro polarizado, lo cual provoca una ligera pérdida de potencia en el haz útil, sin embargo debido a la construcción de algunos tubos láser este es el único arreglo posible, ya que muchos de estos tubos tienen salida de haz láser únicamente a través de uno de los espejos de la cavidad.

Como observa en la figura 1 el haz que sale del tubo pasa primero por un divisor de haz no polarizado, este divisor de haz deja pasar un porcentaje mayor de la intensidad del haz hacia el haz útil y un porcentaje menor hacia el procesamiento de la señal de error.

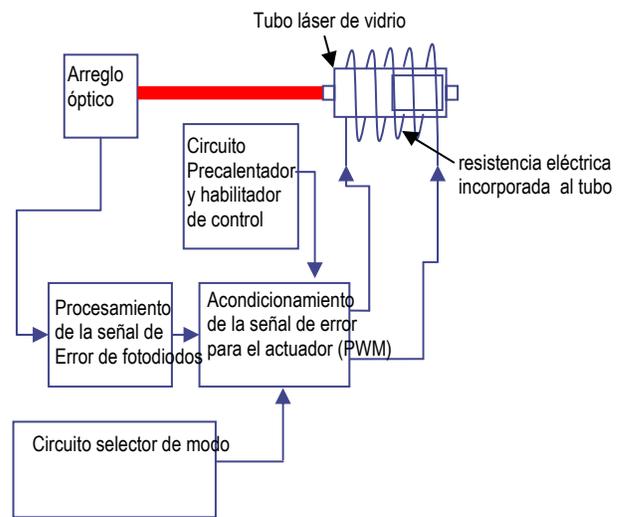


**Fig. 1** Arreglo para obtener la señal de corrección a partir del haz láser principal.

El haz láser que emerge del tubo no tiene polarización determinada, sin embargo la orientación de los planos de polarización no varía en las diferentes regiones de la curva de ganancia, de tal forma que no se produce rotación de dichos planos. Lo anterior es debido a las características de construcción del tubo Uniphase 1108. Este haz que emerge del tubo contiene uno o dos modos longitudinales adyacentes con polarización lineal ortogonal entre sí.

En el arreglo de la figura 1 se muestra la separación de los dos modos longitudinales del haz láser y la incidencia en dos fotodiodos de donde se obtendrá la señal de corrección. Dicha separación se obtiene discriminando la polarización del haz incidente y dirigiendo a cada fotodiodo la intensidad de un modo longitudinal diferente.

El esquema de control general se muestra en la figura 2



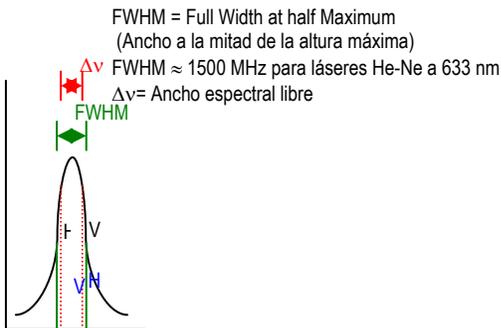
**Fig. 2** Esquema general de control para láser estabilizado por dos modos longitudinales

Dentro de la figura 2, en el bloque de procesamiento de la señal de error, se amplifica la señal eléctrica obtenida de los fotodiodos. Y se envía al bloque de acondicionamiento para el actuador, donde se encuentra un modulador de ancho de pulso (PWM) y una etapa de potencia que entregará la corriente requerida por el actuador (bobina de alambre nicromel). El cual corrige la longitud de la cavidad por medio de la deformación térmica del tubo de vidrio.

En el bloque de circuito precalentador y habilitador de control se encuentra un circuito que ayuda al tubo láser a alcanzar más rápido la temperatura de trabajo, después de lo cual permite que la señal de corrección tenga efecto sobre el actuador.

Un problema intrínseco al método de estabilización es la generación de una ambigüedad en la selección del modo que “amarraría” el control, pues dependiendo de la posición de los dos modos en la curva de ganancia, el control podría estabilizar para la condición de igual intensidad de modos en dos posiciones distintas de frecuencia.

Para aclarar esta ambigüedad, en la figura 3 se presenta un diagrama de la localización de los modos en la curva de ganancia y las posibles posiciones de los modos que causan dicha ambigüedad.



**Fig. 3** Curva de ganancia y localización de modos

Como se ha indicado, existen dos posiciones para los modos longitudinales que cumplen con la condición de igual intensidad dentro de la curva de ganancia. Estas posiciones son:

- a) modo vertical a la derecha y el horizontal a la izquierda
- b) modo horizontal a la derecha y vertical a la izquierda.

El circuito PWM utilizado (SG3525AN) funciona tanto para señal de error positiva como negativa (aun cuando esta especificado únicamente para señal positiva), de tal forma que el sistema de control básico no puede discriminar el orden de los modos, con la señal proveniente de la etapa de detección, únicamente amarra a la posición de cruce por cero más próxima. Es conveniente indicar que la dirección de corrección del control es única, ya que al inyectar corriente al actuador siempre expande el tubo, aumentando la longitud de la cavidad resonante y al disminuir la inyección de corriente siempre se enfría el tubo, acortando la longitud de la cavidad resonante.

Teniendo en cuenta los problemas de ambigüedad se concluyó que existe una sola posibilidad de “amarre” si el control es sensible a la dirección de la corriente por lo que se procedió a rectificar la señal de corrección a la entrada del circuito PWM. Con esta consideración el control siempre “amarra” un mismo orden de componentes, con lo cual se logra la reproducibilidad requerida para el instrumento.

Con el problema de ambigüedad de modos resuelto, se agregó una característica adicional al láser, al incorporarle la posibilidad de conmutar las señales de error e invertir el orden de amarre de las componentes (H-V ó V-H), lo cual es equivalente a seleccionar uno de los dos modos disponibles.

Los circuitos electrónicos desarrollados para el control de la estabilidad, comprenden los circuitos para conversión de corriente-voltaje para fotodiodos, amplificadores, circuitos para derivar la señal de error y la señal de corrección (PWM) y circuitos de potencia para precalentamiento y actuador.

### 3. PRUEBAS DE DESEMPEÑO

Debido a que el instrumento desarrollado es un patrón de frecuencia óptica para un punto fijo las mediciones necesarias para conocer su estabilidad y valor de frecuencia, se realizaron usando los patrones primarios de longitud (láseres estabilizados en frecuencia al  $^{127}\text{I}_2$ ). Por medio de un arreglo de medición heterodino de acuerdo a [1]. A través de estas mediciones se puede verificar la estabilidad de corto y largo periodo del instrumento desarrollado así como calibrar su frecuencia de emisión.

#### 4. RESULTADOS

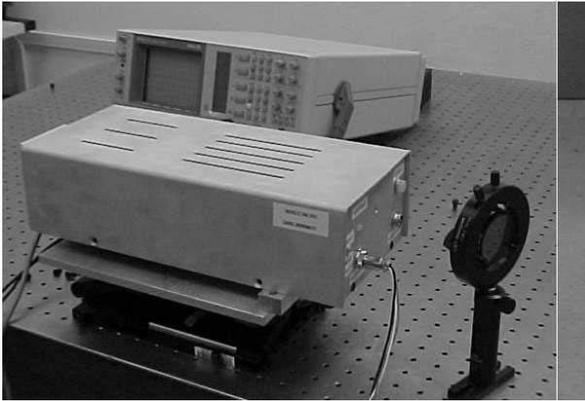
Los resultados obtenidos con el instrumento desarrollado se detallan a continuación:

El tiempo de estabilización obtenido, es de aproximadamente 90 minutos (a partir de encendido hasta alcanzar la estabilidad máxima).

Estabilidad relativa en frecuencia o longitud de onda al vacío( Raíz de la varianza de Allan) :

1 segundo  $3 \times 10^{-11}$   
1000 segundos  $3 \times 10^{-10}$

Incertidumbre de longitud de onda al vacío 1,8 MHz después de 2 hrs de encendido (Calibrado contra



**Figura 4** Aspecto del láser obtenido

patrón nacional de longitud CNM-PNM-2).

Capacidad para sintonizar entre dos frecuencias (separadas 1090 MHz entre sí, correspondiente al ancho espectral libre)

Selección manual de modo

Puerto con señales de servicio para monitoreo y ajuste

#### REFERENCIAS

[1] T.J. Quinn, Mise en Practique of the Definition of the Metre, Metrologia, Volumen 30, Número 5, Paris, BIPM, Enero 1994.

[2] Tong-Long Huang, Yi-Shi Chen, Jow-Tsong Shy, y Hai-Pei Liu, "Two-Mode Frequency Stabilization of an Internal-Mirror 612 nm He-Ne Laser", Proc. Natl. Sci. Coun. ROC(A), 27, 274(2000).

Puerto de control para selección de modo con entrada TTL para control vía PC, e indicador digital de estabilidad (0 V , 10 V) para lectura vía PC

Potencia del haz útil aproximada: 0,5 mW

#### 5. CONCLUSIONES

Es importante mencionar que la característica de selección entre los dos modos longitudinales incorporada al instrumento, es una novedad para este tipo de láseres la cual puede ser utilizada en mediciones interferométricas por ejemplo, para la calibración de bloques patrón, mediciones de desplazamiento con interferómetros homodinos y heterodinos, etc.

Dentro del trabajo futuro que es necesario realizar se encuentra la caracterización de la deriva anual del instrumento y la periodicidad de los ajustes. Así mismo, es muy conveniente estudiar su estabilidad en condiciones de temperatura ambiental no controlada así como la posibilidad de incorporar elementos ópticos para mejorar la divergencia actual del haz, ambos estudios encaminados a evaluar su uso en mediciones interferométricas en campo.

Tomando como base la experiencia obtenida con este proyecto es posible pensar en usar un esquema de procesamiento digital de la señal de error; dicho esquema tendría como principales problemas a resolver la velocidad de respuesta de la señal de corrección y que la respuesta de los fotodiodos es una señal analógica, lo cual complica aún más lo referente a la velocidad de respuesta de la señal de corrección.

Este mismo esquema con algunas modificaciones del control podría usarse si se aplica un campo magnético sobre el tubo a fin de obtener estabilización del láser por efecto Zeeman.

[3] R. Balhorn, H. Kunzmann, and F. Lebowsky, "Frequency Stabilization of Internal-Mirror Helium-Neon Lasers", Appl. Opt. 11, 742(1972).

[4] T.M. Niebauer, J.E. Faller, H.M. Godwin, J.L. Hall, and R.L. Brager, "Frequency Stability Measurements on Polarization-Stabilized He-Ne Lasers", Appl. Opt. 27, 1285(1988)0.