



## SISTEMAS LÁSER MULTICAVIDAD

L. C. Gómez-Pavón, E. Martí-Panameño\*, A. Morales-Hernández\*

Facultad de Ciencias de la Electrónica - BUAP

Av. San Claudio y 18 sur Edif. 129-CU, Puebla, Mex. 72570

E-mail: gpavon@fcfm.buap.mx

\*Laboratorio de Fotónica, Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas - BUAP

Av. San Claudio y 18 Sur, Puebla, Mex., 72570

### RESUMEN

El gran campo de investigación existente para la generación de pulsos ultracortos de alta intensidad, a partir de fuentes láser compactas y de bajo costo, es motivado por las aplicaciones tan importantes que tienen estos pulsos tanto en el ámbito científico como tecnológico; como son, la separación de isótopos, estudios espectroscópicos, comunicaciones ópticas, militares, medicas, en trabajo industrial, por mencionar solo algunas. Actualmente, las investigaciones en el desarrollo de este tipo de fuentes se han centrado solo en algunos laboratorios debido al costo que aun representan y en algunos casos por el espacio físico que ocupan.

Las líneas de investigación, se enfocan en la generación láser a partir de una extensa variedad de materiales utilizados como medio de ganancia así como de diferentes técnicas de bombeo, generación y de nuevos diseños de las cavidades resonantes. En este contexto, resultados relevantes, tanto teóricos como experimentales, se están obteniendo por medio de nuevas técnicas de amarre de modos, activas, pasivas o una combinación de ambas, para diferentes configuraciones láser.

### 1. INTRODUCCION

Los láseres operan usando un principio que fue originalmente inventado para frecuencias en la región de microondas, el cual fue llamado amplificación de microondas por emisión estimulada de la radiación (*maser*<sup>1</sup>, por sus siglas en inglés), este principio fue desarrollado paralelamente por dos grupos científicos, en Estados Unidos por Townes y colaboradores<sup>[1]</sup>, así como por Basov y Prokhorov<sup>[2]</sup>, en la Unión Soviética. En 1958, estos dos grupos extendieron, de manera independiente, el principio *maser* a longitudes de onda del visible, llegando a denominarlo amplificación de la luz por emisión estimulada de la radiación (*laser*<sup>1</sup>, por sus siglas en inglés)<sup>[3,4]</sup>; esto último, tuvo el reconocimiento mundial cuando fueron galardonados con el premio Nobel de física en 1964.

Un láser consiste de tres partes esenciales: 1) un medio amplificador o de ganancia, que produce la amplificación de la luz; 2) un proceso de bombeo, para excitar los átomos del medio y 3) un resonador óptico que permite la retroalimentación del haz amplificado en el medio de ganancia; basándose su principio de operación en el proceso de emisión estimulada propuesto por A. Einstein en 1916<sup>[5]</sup>.

Poco tiempo después de darse a conocer el concepto láser, en 1960 Theodore Maiman<sup>[6]</sup> construyó el primer láser, usando un cristal de rubí como amplificador, bombeado por una lámpara de destello, este láser emitió a 694.3 nm; la lámpara helicoidal de destello rodeaba un cristal de rubí y la cavidad óptica estaba formada por una capa de material altamente reflejante en los extremos de la barra cilíndrica de rubí. A partir de ese momento da inicio el desarrollo de los láseres, empleando como medios de ganancia: gases de He-Ne<sup>[7,8]</sup>, cristales de Neodimio<sup>[9]</sup>, diodos semiconductores de GaAs<sup>[10]</sup>, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)<sup>[11]</sup>, argón<sup>[12]</sup>, colorantes<sup>[13]</sup>, etc.; clasificándose entonces como láseres de estado sólido, gaseosos, semiconductores, líquidos, químicos, de fibra óptica, etc., cada uno de ellos con diferentes características de emisión debido a las propiedades inherentes del tipo de medio utilizado.

Paralelamente a la investigación de diferentes materiales para llevar a cabo acción láser, dio inicio el estudio y desarrollo de diferentes técnicas para generar un incremento en la potencia pico obtenida de los láseres; este campo de investigación surgió de la idea de llevar a cabo la fusión termonuclear por medio de láseres altamente potentes.

### 2. LÁSERES DE ALTA POTENCIA

El incremento de la potencia de los pulsos inició con la técnica de corrimiento libre con la cual se obtuvieron pulsos con duraciones del orden de  $\mu$ s y potencias pico de kilowatts; posteriormente, mediante Q-switching se redujo esta duración al orden de nanosegundos con potencias pico de megawatts; después, con la técnica del amarre de modos la duración de los pulsos se ha reducido

<sup>1</sup> Maser – microwave amplification by stimulated emission of radiation  
Laser – light amplification by stimulated emission of radiation



desde picosegundos hasta femtosegundos y la potencia pico se ha incrementado al rango de gigawatts. Finalmente, desde hace más de 10 años se ha usado una técnica denominada amplificación de pulsos chirpeados<sup>2</sup> (APCH)<sup>[14]</sup>, esta técnica ha sido ampliamente usada en láseres de estado sólido, básicamente de Titanio:Zafiro y Neodimio, permitiendo generar niveles de potencia altos; lo anterior se ha logrado en sistemas láser con un largo del orden del tamaño de un edificio, hasta sistemas compactos que caben sobre una mesa de laboratorio (estos últimos denominados *table-top*). Gracias a esta tecnología, la producción de pulsos láser del orden de femtosegundos e intensidades extremadamente altas ha llegado a ser casi una actividad común en ciertos laboratorios de investigación alrededor del mundo, ya que los sistemas láser *table-top* pueden llegar a generar pulsos más cortos y más intensos que los obtenidos previamente.

En este contexto, un tipo de sistemas estudiados debido a la posibilidad que ofrecen de poder generar pulsos ultracortos de alta intensidad a partir de fuentes que además de ser compactas sean baratas, son los llamados arreglos láser o sistemas multicavidad, para los cuales se han usado diferentes tipos de láseres, como son: estado sólido, CO<sub>2</sub>, semiconductores y fibra óptica. A continuación analizamos el desarrollo de estos sistemas.

### 3. DESARROLLO Y ESTUDIO DE LOS LÁSERES MULTICAVIDAD

El estudio de los sistemas multicavidad, inicia inmediatamente después del descubrimiento del láser, en la década de los 60's. Los primeros trabajos presentados fueron teóricos, el primero de ellos lo dio a conocer Snitzer<sup>[15]</sup> cuando reportó una solución aproximada para el acoplamiento de dos fibras ópticas; después, Jones<sup>[16]</sup> presentó un estudio desde el punto de vista modal del acoplamiento de fibras ópticas, así como el esparcimiento de la luz en una fibra debido a las paredes rugosas.

Fue a principio de la década de los 70's cuando Ripper y Paoli<sup>[17]</sup> presentaron el primer trabajo experimental, reportando el acoplamiento y la consecuente operación coherente de dos láseres de Arsenuro de Galio (GaAs), cuando la distancia entre los láseres es suficientemente pequeña para permitir que el campo óptico de un láser penetre en la región activa del otro. También, en esa década, se presentaron dos trabajos teóricos de gran relevancia en el estudio del acoplamiento de arreglos multicavidad, estos trabajos fueron de Marcuse y Snyder.

<sup>2</sup> La característica *chirp* es aplicada a un pulso que, a lo largo de su envolvente presente modulación - variación - de la frecuencia.

Marcuse<sup>[18]</sup> reportó que dos guías de onda dieléctricas (fibras ópticas, etc.) pueden intercambiar energía si el campo de una de las guías alcanza o llega a la otra; en este trabajo Marcuse sólo consideró el caso del acoplamiento entre modos degenerados de guías de onda dieléctricas, aplicó la teoría de acoplamiento sólo a guías de onda dieléctricas de forma y distribución de índice de refracción arbitraria, consideró el medio dieléctrico de las guías así como el medio circunvecino como pérdidas, obtuvo el coeficiente de acoplamiento por medio de la teoría de perturbaciones y encontró que el acoplamiento entre las fibras depende fuertemente de la separación entre los núcleos de las mismas. Más tarde, Snyder<sup>[19]</sup> presentó la teoría de modos acoplados para fibras ópticas; aquí Snyder derivó un conjunto de ecuaciones de modos acoplados para describir la propagación de modos en sistemas de fibras ópticas uniforme y ligeramente no-uniforme; también, determinó el acoplamiento entre fibras de un arreglo hecho de  $n$  -fibras, cada una en el vértice de un polígono y una al centro, esta última no necesariamente igual a sus  $n$  circunvecinas y finalmente presentó expresiones sencillas para los coeficientes de acoplamiento. En un trabajo posterior, Snyder junto con McIntyre<sup>[20]</sup> ampliaron el formalismo de acoplamiento de modos presentado anteriormente, incluyendo el acoplamiento entre fibras circulares de radio y constante dieléctrica arbitrarios. En cuanto a la parte experimental, Somekh *et al.*<sup>[21]</sup> reportaron por primera vez la demostración de acopladores direccionales ópticos; ellos demostraron que para llevar a cabo el acoplamiento, el canal de guías de onda ópticas deben estar cercanamente espaciados para lograr la transferencia de energía de un canal a otro y que la cantidad de potencia acoplada es determinada por el traslape de los modos en los canales separados, esto es, depende de la separación de las guías, la penetración de los modos en el sustrato y la longitud de interacción. En tanto que E. M. Philipp-Rutz<sup>[22]</sup> reportó la obtención de radiación espacialmente coherente desde un arreglo de tres láseres de GaAs; la potencia pico del dispositivo a temperatura ambiente fue tres veces la potencia de uno de los láseres del arreglo. Para obtener esto, los tres láseres operaban en una cavidad óptica externa, construida de lentes esféricas y espejos planos, el arreglo láser y los espejos planos estaban en el plano focal de las lentes internas de la cavidad óptica. La formación espacialmente coherente del haz hace uso de las propiedades de transformación de Fourier de las lentes internas y el control de los modos transversales se llevó a cabo por un filtro espacial. Después, reportó el estudio experimental tanto de la formación de haces espacialmente coherentes así como del amarre de modos de los modos longitudinales de un arreglo de cuatro láseres de Nd<sup>+3</sup><sup>[23]</sup>; para el amarre de modos solo utilizó un modulador de amplitud mientras que un filtro espacial



en la cavidad óptica llevó a cabo la formación espacialmente coherente del haz y la precisión de sincronización de los pulsos amarrados en modos al espejo de salida de la cavidad óptica, los resultados indicaron un incremento cercano a 16 veces en la radiancia.

En los 80's, se presentan los primeros estudios teóricos para sistemas multicavidad de láseres de colorantes cuando Butler *et al.*<sup>[24]</sup> presentaron un análisis de modos acoplados para describir la salida de arreglos de láseres de colorantes amarrados en fase; encontraron el rompimiento de la frecuencia entre los modos del arreglo en función de la fuerza del acoplamiento entre emisores adyacentes y se llevó a cabo una comparación del análisis de modos acoplados con los cálculos establecidos sobre la teoría de la difracción. Por otra parte, Fader<sup>[25]</sup> estudió teóricamente el amarre de fase de dos láseres acoplados usando el modelo de Spencer y Lamb; este modelo, Spencer - Lamb<sup>[26]</sup>, fue usado para calcular la frecuencia resonante de los modos normales de dos resonadores Fabry-Perot acoplados. Fader encontró que el rango de sintonización de la operación de amarre de fase era proporcional al coeficiente de acoplamiento. Después, por primera vez se predijo teóricamente y se verificó experimentalmente que se puede llevar a cabo un amarre de fase efectivo de un arreglo bidimensional de láseres haciendo uso de la reproducción del frente de onda de una estructura periódica de radiadores coherentes; para llevar a cabo esto, Antyukhov *et al.*<sup>[27]</sup> determinaron las condiciones para un amarre de fase efectivo de un arreglo bidimensional de láseres de CO<sub>2</sub> con un espejo acoplador externo a través de la variación de la distancia entre este espejo y la apertura láser. En trabajo posterior, basándose en el efecto Talbot o auto-reproducción de campos ópticos<sup>[28]</sup>, se examinó un método efectivo de amarre de fase del arreglo propuesto en la referencia anterior. A finales de esa década, Wang y Winful<sup>[29]</sup> presentaron un análisis teórico para investigar la estabilidad de arreglos de láseres semiconductores amarrados en fase usando la teoría de modos acoplados; observaron que la salida de los elementos individuales del arreglo era dinámicamente inestable y mostraron grandes pulsaciones de amplitud caóticas.

A partir de la década pasada es cuando se reportan un gran número de trabajos tanto teóricos como experimentales, de este tipo de sistemas; aunque a finales de ésta, los trabajos se enfocan al estudio de caos y coherencia en estos sistemas debido a que sólo se puede obtener alta potencia si existe una coherencia mutua entre los canales. A principio de esa década, Wang y Winful<sup>[30]</sup> presentaron un modelo para la dinámica espacio-temporal de arreglos de láseres semiconductores; el modelo fue

más allá de la teoría de modos acoplados y dependiendo de los parámetros del arreglo, mediante las simulaciones numéricas se produjeron salidas estables y pulsantes. Mientras que Morel *et al.*<sup>[31]</sup> demostraron un método para el acoplamiento coherente de láseres de fibra monomodal usando una rejilla de fase en la cavidad; los láseres eran independientes, fueron bombeados longitudinalmente y la rejilla combinaba los haces de cada láser en uno solo. Además de estos estudios, Fabiny *et al.*<sup>[32]</sup> examinaron las dinámicas de coherencia y fase mutuas de dos láseres de estado sólido, generados adyacentes uno del otro en un barra de Nd:YAG; el acoplamiento de los láseres se varió cambiando la separación de los haces de bombeo y se formuló un modelo para interpretar los resultados experimentales, acercándose las predicciones teóricas obtenidas con las experimentales, las cuales mostraron que existe una separación crítica para el amarre de fase de los dos láseres. Posteriormente, G. Lescroast *et al.*<sup>[33]</sup> presentan resultados experimentales del acoplamiento de fase de un arreglo lineal de 9 láseres de CO<sub>2</sub> por la técnica de filtro espacial dentro de la cavidad, obteniendo una potencia de salida de 33W en una cavidad con 3 espejos y una eficiencia de acoplamiento del 61%. Meses después, presentaron los resultados acerca de la operación en modo pulsado para el mismo arreglo láser mencionado anteriormente, obteniéndose una eficiencia de acoplamiento tres veces mayor, una potencia pico de 40W y la duración de los pulsos fue del orden de  $\mu$ s. Mientras tanto, P. Glas *et al.*<sup>[34]</sup> reportaron por primera vez la operación de un láser amarrado en modos de un arreglo de fibras de Nd<sup>3+</sup> multimodal. El arreglo consistía de 150 fibras bombeadas por una lámpara de destello con separación centro a centro irregular y diferentes longitudes; una combinación de modulación de pérdidas activa/pasiva (modulador de amplitud/celda de colorante) produjo pulsos con duración más corta que 9 ps con energías de más de 2  $\mu$ J. Sin un modulador de pérdidas en el resonador, una serie de picos aparecen, emitiendo cada fibra su secuencia de picos característicos sin tomar en cuenta a las fibras circundantes. Coincidiendo la frecuencia del modulador acusto-óptico (AOM) al inverso del tiempo de una vuelta de un pulso en el resonador y seleccionando la concentración de colorante adecuada, las fibras del arreglo dejan de emitir picos aleatorios. Finalmente, notaron que las pérdidas efectivas en el sistema láser son considerablemente reducidas en el caso de la emisión acoplada debido al amarre y que la transferencia de energía entre las fibras, excluyendo el acoplamiento de ondas evanescentes, se lleva a cabo con la ayuda de los elementos del resonador (difracción, aberraciones). Aunado a estos trabajos, Xu *et al.*<sup>[35]</sup> presentaron un estudio experimental del amarre de fase en un arreglo láser de dos elementos con desintonización; el estudio se llevó a cabo en un arreglo de dos láseres de



Nd:YAG ópticamente bombeados y acoplados por ondas evanescentes, en este estudio demostraron que un arreglo láser de dos elementos no puede ser caracterizado simplemente como un sistema de dos modos. Retomando el efecto Talbot en <sup>[36]</sup>, Kandidov y Levakova propusieron una cavidad Talbot cilíndrica para llevar a cabo el amarre de fase de un arreglo láser circular; consideraron que en un sistema cilíndrico un arreglo de láseres se localiza en un arco de un círculo de radio  $R$  rodeado por un espejo acoplador, el cual es un cilindro circular, las guías de onda se acoplan ópticamente debido a la divergencia de la radiación resultante de la difracción y la reflexión por el espejo acoplador. Después de este trabajo, Kandidov y Kondrat'ev<sup>[37]</sup> derivaron una expresión generalizada para los coeficientes de acoplamiento de los canales en un arreglo láser colocado en una cavidad de geometría planar, cilíndrica o esférica; además, hicieron un estudio de la estructura de los modos y de las distribuciones del campo cercano y lejano, tanto en los arreglo láser planar y cilíndrico en cavidades Talbot. Otro arreglo de láseres de  $\text{CO}_2$  lo presentaron Abramski *et al.*<sup>[38]</sup>, quienes investigaron un arreglo de 39 elementos de láseres de  $\text{CO}_2$ , excitados por una descarga de radiofrecuencia, produciendo una potencia láser en onda continua de 750W. En sistemas láser de fibra, basándose en el experimento numérico, L. C. Gómez-Pavón y E. Martí-Panameño<sup>[39]</sup> reportaron la generación sincrónica de pulsos en sistemas láser multicavidad de fibra óptica dopada con Erblio. Tales sistemas bajo estudio están conformados por un arreglo de dos y hasta siete fibras dopadas con Erblio, acopladas de acuerdo a una geometría bien definida en dependencia del número de cavidades en el arreglo, con la finalidad de obtener una interacción de energía entre ellos a través de las ondas evanescentes. En una de las cavidades un modulador de amplitud es colocado ayudando a llevar a cabo el amarre de modos en todo el arreglo a través de la interacción no lineal de las ondas evanescentes de esta cavidad y la de las restantes. Finalmente realizaron la caracterización del sistema y con la finalidad de conocer su estabilidad consideraron el efecto del rompimiento de simetría sobre la característica de los pulsos.

#### 4. CONCLUSION

En base a lo anterior, podemos concluir que uno de los sistemas altamente promisorios para la generación de pulsos ultracortos de alta intensidad por medio de fuentes láser compactas y de bajo costo, son los sistemas láser multicavidad, los cuales tienen como característica principal la interacción energética entre los canales por medio de sus ondas evanescentes.

Es remarcable el hecho que dentro de este tipo de sistemas, los que han generado pulsos ultracortos a través

de la interacción de estas ondas y haciendo uso de la técnica del amarre de modos, tanto activa como pasiva, son los sistemas multicavidad de fibra óptica dopada con  $\text{Nd}^{+3}$ ; sin embargo, en este sistema la emisión simultánea sólo se obtiene en algunas fibras, no en todas las que conforman el sistema. Es por esto que surge la necesidad de desarrollar sistemas con una forma más sencilla de lograr el amarre de modos en éste, así como nuevas geometrías más específicas que permitan la interacción energética entre todos los canales que forman el sistema, y así poder llevar a cabo la emisión de pulsos ultracortos altamente energéticos, totalmente sincronizados, en todos los canales. Aunado a lo anterior es necesario que los canales que conformen el sistema permitan obtener un sistema multicavidad compacto y de bajo costo.

#### REFERENCIAS

- [1] J. P. Gordon, H. J. Zeiger and C. H. Townens, *Phys. Rev.*, 95, 282, 1954.
- [2] N. G. Basov and A. M. Prokhorov, *Soviet Phys. JETP English Transl.*, 27, 431, 1954.
- [3] A. L. Schawlow and C. H. Townes, *Phys. Rev.*, 112, 1940, 1958.
- [4] A. M. Prokhorov, *Soviet Phys. JETP English Transl.*, 34, 1658, 1958.
- [5] A. Einstein, *Phys. Z.*, 18, 121, 1917.
- [6] T. H. Maiman, *Nature*, 187, 493, 1960.
- [7] A. Javan, W. R. Bennett and D. R. Herriott, *Phys. Rev. Lett.*, 6, 106, 1961.
- [8] A. D. White and J. D. Ridgen, *Proc. IRE.*, 50, 1967, 1962.
- [9] E. Snitzer, *Phys. Rev. Lett.*, 7, 444, 1961.
- [10] R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys and R. O. Carlson, *Phys. Rev. Lett.*, 9, 336, 1962
- [11] C. K. N. Patel, *Phys. Rev. Lett.*, 13, 617, 1964.
- [12] W. E. Bell, *Appl. Phys. Lett.*, 4, 34, 1964.
- [13] P. P. Sorokin and J. R. Lankard, *IBM J. Res. Dev.*, 10, 162, 1966.
- [14] D. L. Matthews and M. D. Rosen, *Scientific American*, 259, 84, 1988.
- [15] E. Snitzer, *Advances in Quantum Electronics*, Columbia University Press, New York, 1961.
- [16] Alan L. Jones, *J. Opt. Soc. Am.*, 55, 261, 1965.
- [17] J. E. Ripper and T. L. Paoli, *Appl. Phys. Lett.*, 17, 371, 1970.
- [18] D. Marcuse, *The Bell System Tech. J.*, 50, 1791, 1971.
- [19] Allan W. Snyder, *J. Opt. Soc. Am.*, 62, 1267, 1972.
- [20] P. D. McIntyre and A. W. Snyder, *J. Opt. Soc. Am.*, 63, 1518, 1973.
- [21] S. Somekh, E. Garmire, A. Yariv, H. L. Garvin and R. G. Hunsperger, *Appl. Phys. Lett.*, 22, 46, 1973.



- [22] Elisabeth M. Philipp-Rutz, *Appl. Phys. Lett.*, 26, 475, 1975.
- [23] Elisabeth M. Philipp-Rutz, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-14, 112, 1975.
- [24] J. K. Butler, D. E. Ackley and D. Botez, *Appl. Phys. Lett.*, 44, 293, 1984.
- [25] W. J. Fader, *IEEE J. of Quatum Elect.*, QE-21, 1838, 1985.
- [26] M. B. Spencer and W. E. Lamb Jr., *Phys. Rev.*, A5, 893, 1972.
- [27] V. V. Antyukhov, A. F. Glova, O. R. Kachurin, F. V. Lebedev, V. V. Likhanskii and A. P. Napartovich, *JEPT Letters*, 44, 78, 1986.
- [28] A. A. Golubentsev, V. V. Likhanskii and A. P. Napartovich, *Sov. Phys. JEPT*, 66, 676, 1988.
- [29] S. S. Wang and H. G. Winful, *Appl. Phys. Lett.*, 52, 1774, 1988.
- [30] S. S. Wang and H. G. Winful, *J. Appl. Phys.*, 73, 462, 1993.
- [31] J. Morel, A. Woodtli and R. Dändliker, *Opt. Lett.*, 18, 1520, 1993.
- [32] L. Fabiny, P. Colet, R. Roy and D. Lenstra, *Phys. Rev. A*, 47, 4287, 1993.
- [33] G. Lescroast, R. Muller and G. Bourdet, *Opt. Comm.*, 108, 289, 1994.
- [34] P. Glas, M. Naumann, A. Shirrmacher and H. Schönngel, *Opt. Comm.*, 109, 101, 1994.
- [35] J. Xu, K. K. Lee and Y. C. Chen, *Opt. Comm.*, 117, 198, 1995.
- [36] V. P. Kandidov and I. G. Levakova, *Quantum Electron.*, 25, 83, 1995.
- [37] V. P. Kandidov and A. V. Kondratev, *Quantum Electron*, 2, 234, 1997.
- [38] K. M. Abramski, A. D. Colley, A. J. Baker and D. R. Hall, *IEEE J. of Quantum Electron.*, 32, 340, 1996.
- [39] L. C. Gómez-Pavón and E. Martí-Panameño, *Optics Communications*, 191, 323, 2001.