

Medición del Ancho Espectral de Láseres Semiconductores, mediante Auto-Heterodinaje Óptico.

Corral F.*, Gordón C.*, Guzmán R.*, Jiménez A.*, Carpintero G.**

*Programa de Doctorado. Grupo de Optoelectrónica y Tecnología Láser. Universidad Carlos III de Madrid.
Madrid, España (e-mail: fvcorral@gmail.com; ingcarlosgordon@gmail.com; rcguzman@ing.uc3m.es; ajgalind@pa.uc3m.es)

**Departamento de Tecnología Electrónica. Universidad Carlos III de Madrid.

Madrid, España (e-mail: guiller@ing.uc3m.es)

Resumen: Se presentan mediciones de ancho espectral de láseres basados en arreglo de guías de onda tipo grating (Arrayed Waveguide Grating, AWGL), que forman parte de circuitos integrados fotónicos (Photonic Integrated Circuits, PICs), utilizando el método de auto-heterodinaje óptico retardado con modulador de fase electro-óptico. Se demuestra que los láseres AWGL tienen pequeño ancho espectral, en el rango de operación de longitud de onda de 1550 nm; estos valores mínimos potencializan a dicho láser como un dispositivo de gran utilidad en comunicaciones de banda ancha, en sistemas de multiplexado por longitud de onda y en generación de ondas milimétricas para comunicaciones inalámbricas.

Palabras clave: Láseres basados en AWG, ancho espectral, autoheterodinaje, circuitos integrados fotónicos, fibra óptica.

Abstract: Linewidth measurements of Arrayed Waveguide Grating (AWG) based lasers in photonic integrated circuits (PICs), using self-heterodyning optical delayed with electro-optic phase modulator, are presented. It is found that AWG lasers have very narrow linewidth, working on the 1,550 nm wavelength range; these minimum values show to those lasers like a useful devices in broadband communications, wavelength division multiplexing systems and generation of carrier wave frequencies into millimeter wave range for wireless communications.

Keywords: AWG based lasers, laser linewidth, self-heterodyning, photonic integrated circuit, optical fiber.

1. INTRODUCCION

En las telecomunicaciones actuales se ha generalizado el uso de láseres de semiconductor como fuente óptica para el transporte de información. En cuanto a las redes troncales y de acceso óptico es común el uso de tecnología WDM (Wavelength Division Multiplexing), debido a su gran capacidad de transferencia de datos. En sistemas WDM, es importante que las fuentes ópticas tengan un estrecho ancho espectral o ancho de línea, a fin de contar con canales ópticos libres de interferencia que transporten altas tasas de transmisión y también para minimizar la dispersión cromática de los enlaces por fibra óptica [8].

Para la generación de ondas milimétricas, mediante heterodinaje óptico, usando dos fuentes ópticas independientes, también se requiere que los láseres tengan estrechos anchos espectrales. En láseres que forman parte de circuitos integrados fotónicos (Photonics Integrated Circuits, PICs), con el avance tecnológico, su ancho espectral se ha minimizado [2]

En este trabajo se presenta la medición de ancho espectral de láseres semiconductores basados en arreglo de guías de onda tipo grating (Arrayed Waveguide Grating, AWG), que forman parte de circuitos integrados fotónicos (Photonic Integrated Circuits, PICs), mediante el método de autoheterodinaje óptico, utilizando un modulador de fase electro-óptico. Se realizan mediciones para verificar su estrecho ancho espectral, lo cual es de gran utilidad para una eficiente generación de ondas milimétricas en sistemas inalámbricos y en sistemas de telecomunicaciones de alta capacidad que utilizan tecnologías de multiplexado por longitud de onda (WDM).

El presente artículo se organiza de la siguiente manera: El numeral uno contiene la introducción, en el numeral dos se describe el método de medición, los materiales y equipo utilizados; en el numeral tres se indican los resultados obtenidos y en el numeral cuatro se expresan las conclusiones.

2. METODOS DE MEDICION DEL ANCHO ESPECTRAL, MATERIALES Y EQUIPO UTILIZADOS

El espectro de luz se confina en una banda estrecha centrada en torno a una frecuencia central, f_0 . El linewidth de la

emisión de un láser es el ancho Δf (Hz) de su densidad espectral.

La densidad espectral, $S(f)$, representa la potencia promedio por unidad de área y se mide en w/cm^2 -Hz.

La función de autocorrelación, $G(\tau)$, y la densidad espectral, $S(f)$, se relacionan por la expresión (1), conocida como el Teorema de Wiener-Khinchin [11], donde f es la frecuencia y τ el retardo.

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} G(\tau) \cdot \exp(-j2\pi f\tau) \cdot d\tau \quad (1)$$

$G(\tau)$, se determina con la expresión (2). Se define como la función de autocorrelación de la función de onda randómica compleja estacionaria dependiente del tiempo, $U(t)$, y es el promedio del producto de su compleja conjugada, $U^*(t)$ y de su función retardada en el tiempo $U(t + \tau)$.

$$G(\tau) = \langle U^*(t)U(t + \tau) \rangle \quad (2)$$

Las dos funciones $S(f)$ y $G(\tau)$, tienen anchos inversamente relacionados. Una fuente óptica de ancho espectro tiene un corto tiempo de coherencia, τ_c , mientras que una fuente con estrecho ancho espectro tiene un largo tiempo de coherencia. Hay varias definiciones de ancho espectral. La más común es la denominada FWHM (Full Width at Half Maximum), que corresponde al ancho total de la función $S(f)$ a la mitad de su máximo valor.

El ancho espectral es inversamente proporcional al tiempo de coherencia. La relación entre el tiempo de coherencia, τ_c y el ancho espectral, Δf , depende del perfil espectral. Por ejemplo, si el perfil es Lorentziano se tiene $\Delta f = 0,32/\tau_c$ y si es Gaussiano corresponde a $\Delta f = 0,66/\tau_c$. En luz monocromática, el ancho de línea es cero y el tiempo de coherencia, τ_c , es infinito.

El ancho espectral no se mide directamente con un analizador de espectros óptico (Optical Spectrum Analyzer, OSA) debido a que en general, los anchos espectrales de los láseres son más estrechos que la resolución del equipo.

Existen varios métodos de medición del ancho espectral de un diodo láser de semiconductor. Los principales son los siguientes [12]:

- Auto-heterodinaje (Self-Heterodyne, SHE)
- Auto-homodino (Self-Homodyne, SHO)
- Interferómetro de Michelson (Michelson interferometer, MI)
- Interferómetro Fabry-Perot (Fabry-Perot interferometer, FP)

El método auto-homodino y de autoheterodinaje esencialmente son similares, ya que no requieren de un láser de referencia como oscilador local. El objetivo es convertir las fluctuaciones de frecuencia y fase óptica en variaciones de intensidad de luz, en un interferómetro tipo Mach Zehnder en el cual el campo óptico es mezclado con una réplica retardada del mismo y la interferencia de la señal es detectada con un fotodiodo. El ancho espectral se obtiene del espectro

de potencia de las fluctuaciones de la fotocorriente. La técnica homodina, matemáticamente es una autocorrelación. El espectro óptico a la frecuencia de operación se autocorrela con la versión retardada de sí misma, para producir un espectro fluctuante en el tiempo centrado a cero Hz. En el caso heterodino, se utiliza un modulador de fase para desplazar el espectro a una frecuencia superior y rechazar la señal DC detectada en el fotodiodo, permitiendo el uso de un analizador de espectro estándar y medir el espectro de las variaciones de la fotocorriente. [1-5]

En el presente trabajo se escogió el método de autoheterodinaje óptico en razón de que al usar un modulador de fase (a diferencia de la técnica homodina), se desplaza la detección de frecuencia lejos del cero, donde el analizador de espectro eléctrico tiene pobre respuesta y pierde la mitad del mismo; lo que dificulta la medición, en especial cuando el ancho espectral es muy estrecho.

2.1 Método de Auto-heterodinaje (Self-Heterodyne, SHE)

Este método se basa en el principio de interferencia de la onda con la réplica de sí misma, retardada en el tiempo, y gobernada por su grado de coherencia temporal al tiempo de retardo. Su implementación permite romper la coherencia de la onda [4-6]. El esquema general para realizar la medición se indica en la Fig.1.

La señal óptica de salida del láser objeto de medición, ingresa a un acoplador de 3 dB (50/50). Por un lado del divisor se coloca un tramo de fibra óptica (línea de retardo) que rompe la coherencia de fase de la señal original, cuya longitud L debe ser mayor que la longitud de coherencia.

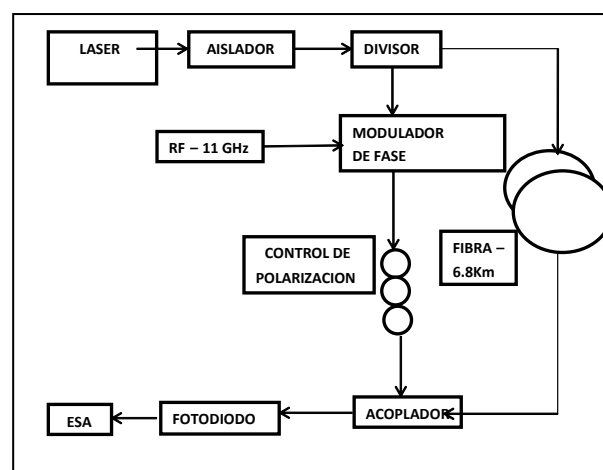


Figura 1. Esquema para realizar la medición del ancho de línea espectral

$$L \gg L_c \quad (3)$$

$$L_c = c \cdot \tau_c \quad (4)$$

Donde: L es la longitud de la fibra óptica, L_c es la longitud de coherencia, c , es la velocidad de la luz y τ_c es el tiempo de coherencia.

La segunda salida del divisor óptico se conecta al modulador de fase para realizar un desplazamiento en frecuencia de la señal óptica y tener la señal modulada, además de conseguir una medición exacta, lejana de banda base e impedir el ruido de bajas frecuencias.

Los dos rayos de salida se combinan en un acoplador de 3 dB, como si fueran láseres independientes con un offset definido por la frecuencia del modulador, para lograr el batido de las dos señales. El batido heterodino de la señal es detectada por el fotodiodo. La fotocorriente es medida en el analizador de espectro eléctrico (Electric Spectrum Analyzer, ESA).

La técnica auto-heterodina ofrece la más alta resolución para medir el ancho espectral de los láseres, pero requiere que la longitud de retardo de la fibra sea mucho mayor que la longitud de coherencia de la señal óptica entrante; por tanto para medir anchos espectrales muy estrechos, se requieren grandes tramos de fibra de retardo, por ejemplo de hasta 37 Km, para valores inferiores a 3 KHz.

En la tabla 1 se muestra una comparación del ancho espectral de varios láseres, cuyas mediciones se han efectuado con el método de autoheterodinaje óptico. También se indica la longitud de fibra óptica utilizada como línea de retardo y el tiempo de coherencia calculado.

2.2 Materiales y equipo utilizado

Para la medición del ancho espectral, se implementó el setup con los siguientes elementos: un aislador óptico de 60 dB para evitar posibles reflexiones posteriores hacia el láser, cuyo rango es de 1550 nm.; dos acopladores de 3 dB (50:50) que operan en el rango de tercera ventana de transmisión (1550 nm); 6,8 kilómetros de fibra óptica monomodo desnuda conforme a la Recomendación ITU-T G.655; modulador de fase electro-óptico de neobato de litio (LiNbO3), operado con una señal de radiofrecuencia de onda continua (CW) de 11 GHz y niveles de potencia de hasta 17 dBm, generada por un sintetizador marca Agilent 83711A. La imagen fotográfica del setup implementado se indica en la Fig. 2.

Adicionalmente se usó un fotodiodo ultra rápido U2T, tipo uni-traveling carrier photodiode (UTC-PD) [9] con ancho de banda de hasta 40 GHz, cuya fotocorriente generada se registró en un analizador de espectro radioeléctrico, marca ANRITSU MS2668C.

Tabla 1. Datos referenciales de mediciones de ancho espectral de varios láseres. Δf , ancho espectral; τ_c , tiempo de coherencia; L : longitud de fibra óptica

LASER	Δf	τ_c (μs)	L (Km)
Láser monomodo doble heteroestructura (DH), $\lambda = 840$ nm [6]	3 MHz	0,1	1,5
Discrete mode laser diode, DMLD, $\lambda = 1550$ nm [7]	~100 KHz	3,2	12
Dual wavelength, DFB, $\lambda = 1550$ nm [13]	600 KHz	0,53	2,5
Láser multi-longitud de onda, basado en AWG (arrayed waveguide grating) [2]	125 KHz	2,56	5
Láser multi-longitud de onda, basado en AWG y MIRs (multimode interference reflectors) [3]	150 KHz	2,13	25

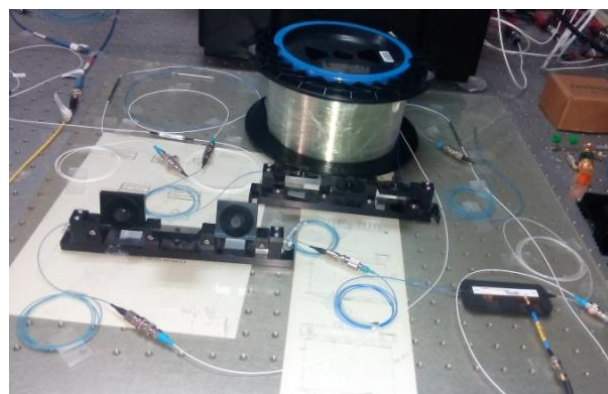


Figura 2. Fotografía del setup usado para la medición del ancho espectral

3. RESULTADOS

Para comprobar el buen funcionamiento del setup implementado, se realizó la medición del ancho espectral en el módulo láser monomodo sintonizable RIO ORION [14], con longitud de onda de operación centrada a 1548,54 nm, corriente de operación de 115 mA y potencia óptica de salida de 12,3 mW. Se usó el analizador de espectro Anritsu, con span de 1 MHz, RBW (Resolution Bandwidth) de 3KHz y VBW (Video Bandwidth) de 1 KHz

Se realizaron varios ajustes a la señal medida en el láser monomodo, aplicando el método de mínimos cuadrados y con diferentes perfiles: Gaussian, Hiperbolic, Lorentzian y TwoSideExponential [10]. El de menor error cuadrático ($\sum \text{error}$) es el de perfil Lorentziano, según se muestra en la Tabla 2 y Fig.3. Este resultado es acorde a la teoría ya que la mayoría de emisiones láser tienen dicho perfil.

El valor del ancho espectral óptico de fábrica es de 6 KHz y el valor medido es de 8,4 KHz, considerando un ajuste Lorentziano.

Tabla 2. Resultados obtenidos del ajuste realizado a la medición del ancho espectral, aplicando el método de mínimos cuadrados, con diferentes perfiles. Los parámetros X_{max} , $Amplitud$, $Ancho$ y $Offset$, varían según las fórmulas de cada uno de los perfiles.

AJUSTE	PARAMETROS					LINEWIDTH	
	Σ error	X_{max}	Amplitud	Ancho (w)	Offset	ELECTRICO (KHz)	ÓPTICO (KHz)
GAUSSIAN	3212,337539	11000,006	22,84636546	0,1	-97,646701	70,71	35,355
HYPERBOLIC	1467,776932	11000,007	26,92066656	0,056608601	-96,491817	36,6936949	18,34684745
LORENTZIAN	491,2124916	11000,006	30,89740727	0,033781682	-97,91736	16,89084076	8,445420378
TWO SIDED EXP	821,7035928	11000,006	28,88071876	0,085131144	-96,837017	35,15916266	17,57958133

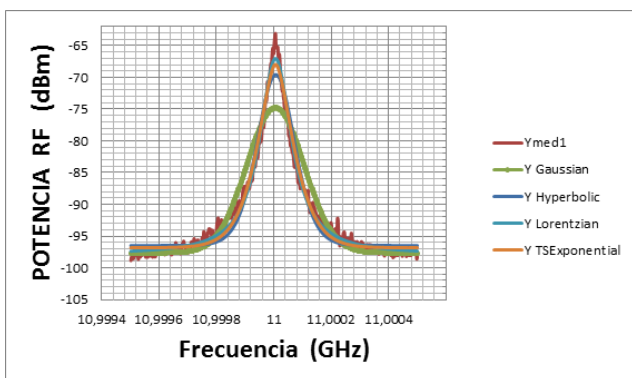


Figura 3. Medida de ancho espectral óptico del láser monomodo RIO ORION, polarizado a 115 mA y ajustes realizados.

Con este antecedente se efectuó la medición del ancho espectral en el láser de cavidad extendida AWGL (Arrayed Waveguide Grating Laser) que consta de dieciséis canales. Este dispositivo monolíticamente integrado se basa en un conjunto de amplificadores ópticos de semiconductor (SOA: Semiconductor Optical Amplifiers) y un arreglo de guías de onda tipo grating, como se muestra en la Fig.4. Consiste de dieciséis SOAs (uno por canal) y un SOA adicional denominado *boost* que se coloca a la salida del AWG, para amplificar la potencia óptica de salida. Todos los SOAs son de 600 μm de longitud; el boost es de 750 μm . El AWG actúa como un filtro intra cavidad, para establecer las longitudes de onda de operación, filtrando los modos en la cavidad del láser que se forma en el chip de 4 mm. La longitud de onda central del AWG es $\lambda = 1550 \text{ nm}$, el espaciamiento entre canales es $\Delta\lambda = 100 \text{ GHz}$ (0.8 nm) y el rango espectral (FSR) es 900 GHz (7.2 nm). [2]

Se realizó la medición del ancho espectral del láser AWGL en el canal 3, con los siguientes parámetros: corriente del boost de 70 mA, corriente del canal de 60 mA. Para el efecto se utilizó el analizador de espectro Anritsu MS2668C, con span de 25 MHz, RBW de 30 KHz y VBW de 3 KHz. La señal eléctrica detectada por el fotodiodo se indica en la Fig.5. El valor del ancho de línea en el espectro eléctrico es de 237 KHz y el ancho espectral óptico, considerando un ajuste lorentziano es de 118,5 KHz, es decir la mitad del ancho espectral de la señal eléctrica.

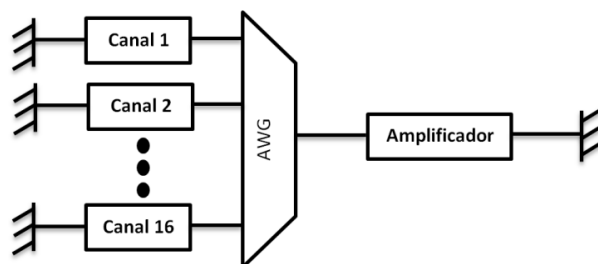


Figura 4. Láser de cavidad extendida, basado en Arreglo de Guías de onda, tipo Grating (AWGL) de 16 canales.

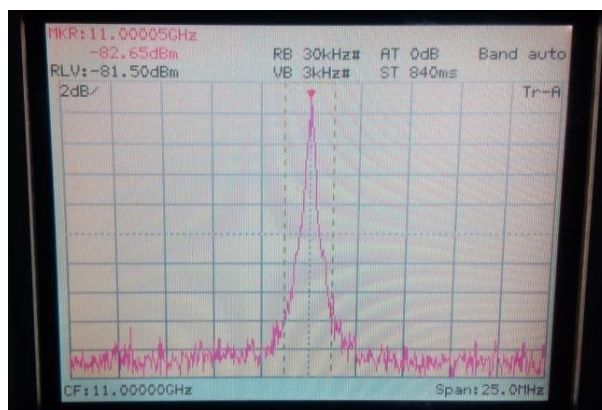


Figura 5. Señal eléctrica detectada por el fotodiodo a partir de la señal óptica autoheterodina del láser AWGL (Array Waveguide Grating Laser).

4. CONCLUSIONES

Con el setup implementado se han realizado mediciones de estrecho ancho espectral de láseres que forman parte de circuitos integrados fotónicos, utilizando el método de autoheterodinaje con línea de retardo de fibra óptica; también se ha utilizado un modulador de fase electro-óptico que consigue el desplazamiento de la señal de radiofrecuencia a zonas lejanas al cero, de modo que la medición del ancho espectral óptico es más precisa.

Los valores de ancho espectral del láser de cavidad extendida basado en arreglo de guías de onda tipo grating (AWGL), son menores a 120 KHz; estos valores mínimos potencializan a dicho láser como un dispositivo de gran utilidad en comunicaciones de banda ancha, en sistemas de multiplexado por longitud de onda (WDM) y en generación de ondas milimétricas para comunicaciones inalámbricas.

REFERENCIAS

[1] Ali, A.H. y Abdul-Wahid S.N., "Analysis of Self-Homodyne and Delayed Self-Heterodyne Detections for Tunable Laser Source Linewidth Measurements", 2012, vol. 2, no. 10, pp. 1-6.

- [2] Carpintero, G., Rouvalis, E., Lawniczuk, K., Van Dijk, F., Chtioui, M., Renaud, C. C., Leijtens, X., Bente, E., y Seeds, A. "Millimeter-wave signal generation by optical heterodyne of two channels from an arrayed waveguide grating-based multi-wavelength laser". 2012, *IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics*, pp 51–54
- [3] Jing, Z. "Integrated Multi-Wavelength Transmitter using Filtered - Feedback", Dissertation, Eindhoven University of Technology, 2013, pp 56–57.
- [4] Kelly, B., Phelan R., Jones, D., Herbert, C., O'Carroll J., Rensing, M., Wendelboe, J., Watts, C.B., Kaszubowska-Anandarajah, A., Perry P., Guignard, C., Barry, L.P., y O'Gorman, J., "Discrete mode laser diodes with very narrow linewidth emission", *Electron. Lett.*, 2007, Vol., No.23.
- [5] Ludvigsen, H., Tossavainen M. y Kaivola M., "Laser linewidth measurements using self-homodyne detection with short delay," *Opt. Commun.* 155(1-3), 1998, pp. 180–186.
- [6] Okoshi, T., Kikuchi, K., y Nakayama, A. 'Novel method for high Resolution measurement of laser output spectrum', *Electron. Lett.*, 1980, Vol. 16, pp. 630-631
- [7] Phelan R., Kelly, B., Jones, D., Herbert, C., O'Carroll J., Rensing, M., Cai, B., C.B., Kaszubowska-Anandarajah, A., Perry P., Stopford, J., Barry, L.P., y O'Gorman, J., "Discrete mode laser diodes with ultra narrow linewidth emission < 3 KHz", in *OFC/NFOEC, Optical Fiber Communication Conference and Exposition and The National Fiber Optic Engineers* (Optical Society of America, 2008)
- [8] Prat Josep, "Next-Generation FTTH Passive Optical Networks", Ed. Springer Science, 2008, pp 7-8.
- [9] Rouvalis, E., Chtioui, M., Tran, M., Lelarge, F., Van Dijk, F., M. J. Fice, M.J., Renaud, C.C., Carpintero, G., y Seeds A. "High-speed photodiodes for InP-based photonic integrated circuits" *Opt. Express*, 2012, vol. 20, no. 8, pp. 9172-9177.
- [10] Sala, K., Kenney-Wallace G.A. y Hall G.E. "CW Autocorrelation Measurements of Picosecond Laser Pulses", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, vol. QE-16, no. 9, pp 990–996
- [11] Saleh and Teich, "Fundamentals of Photonics", Ed. Wiley and Sons, 2a. edición, 2007, pp 410-411.
- [12] Van Deventer, M.O., Spano, P, y Nielsen, S.K., "Comparison of DFB linewidth measurement techniques results from COST 215 round robin", *Electron. Lett.*, 1990, Vol. 26, pp. 2018-2020
- [13] Van Dijk, F., Accard, A., Enard, A., Drisse, O., Make, D., y Lelarge, F. "Monolithic dual wavelength DFB lasers for narrow linewidth heterodyne beat-note generation." in *International Topical Meeting on Microwave Photonics* jointly held with the 2011 Asia-Pacific Microwave Photonics Conference, pp 73–76.
- [14] <http://www.rio-inc.com/products/orion.php>. Consultado el 7-04-2014