

On-chip Optical Frequency Comb Generator, with Electro-Optic Modulators

Generador de peines de frecuencias ópticas mediante circuito integrado fotónico, con moduladores electro-ópticos

V. Corral^{1,*}, C. Gordón², R. Guzmán³, G. Carpintero³

1. *Departamento de Ciencias Exactas, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE*

Sangolquí, Ecuador, 171-5-231B

2. *Electronics and Industrial Engineering, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador*

3. *Electronic Technology, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, Madrid, Spain*

(*) E-mail: fvcorral@gmail.com

Received: 22/02/2018

Accepted: 22/01/2019

DOI: 10.7149/OPA.52.1.50020

ABSTRACT:

We present the results of the photonic integrated circuit measurements in order to implement an optical frequency comb generator (OFCG) based on a recirculating ring using electro-optic phase modulators (EOPM). The design is established on the functional blocks of the OCLARO Tech generic integration platform. The optical comb produces multiple wavelengths, equally spaced by the input RF frequency provided by an external synthesizer from a seed wavelength. This λ seed can be of external or internal (on-chip) character, by means of a DBR (Distributed Bragg Reflector) single mode laser in order to develop a fully integrated OFCG. This structure is compact and small (6 x 2 mm), whose elements are interconnected with InP waveguides that replaces the optical fiber, avoiding thermal variations that affect the generated signal. For our knowledge, this is the first time that measurements are made on this type of structures.

Key words: Integrated Optics, Optical frequency comb, Electro-optic modulator.

RESUMEN:

Presentamos los resultados de las mediciones de un circuito integrado fotónico cuya finalidad es implementar un generador de peine de frecuencias ópticas (OFCG) basado en un anillo recirculante utilizando moduladores de fase electro-ópticos (EOPM). El diseño se basa en los bloques funcionales de la plataforma genérica de integración de OCLARO Tech. El peine óptico produce múltiples longitudes de onda, equiespaciadas por la frecuencia RF de entrada proporcionada por un sintetizador externo, a partir de una longitud de onda semilla. Esta λ semilla puede ser de carácter externa o interna (on-chip), por medio de un láser integrado monomodo DBR (Distributed Bragg Reflector), para desarrollar un OFCG totalmente integrado. La ventaja de esta estructura es que se trata de un OFCG compacto de pequeñas dimensiones (chip de 6 x 2 mm), cuyos elementos se interconectan con guías de onda de InP que reemplaza a la fibra óptica, evitando variaciones térmicas que afecten la señal generada. Para nuestro conocimiento, es la primera vez que se realizan mediciones en este tipo de estructuras.

Palabras clave: Óptica integrada, Peine de frecuencias ópticas, Modulador electro-óptico.

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] E. P. Cano, C. de Dios Fernandez, Á. R. C. Serrano, M. Ortsiefer, P. Meissner, P. Acedo, "Experimental Study of VCSEL-Based Optical Frequency Comb Generators," in *IEEE Photonics Technology Letters* **26**, 2118-2121 (2014)



- [2] Z.Wang, K. Van Gasse, V. Moskalenko, S. Latkowski, E. Bente, B. Kuyken, G. Roelkens, "A III-V-on-Si ultra-dense comb laser," *Light: Science & Applications* **6** (2017)
- [3] S. Bennett, B. Cai, E. Burr, O. Gough, A. J. Seeds, "1.8-THz bandwidth, zero-frequency error, tunable optical comb generator for DWDM applications," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11**, 551-553 (1999).
- [4] Silva, C.F.C., Seeds, A.J., "A dense WDM source for high spectral efficiency system using comb generation and SG-DBR injection-locked laser filtering", *European Conference on Optical Communication* (2001).
- [5] International Telecommunications Union. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.692-199810-1/es>.
- [6] P.Shen, Nathan J. Gomes, Phillip A. Davies, Peter G. Huggard, Brian N. Ellison, "Analysis and demonstration of a fast tunable fiber-ring based optical frequency comb generator", *J. Lightw. Technol.*, **25**, 3257-3264 (2007).
- [7] T. Sakamoto, T. Kawanishi, M. Izutsu, "Widely wavelength-tunable ultra-flat frequency comb generation using conventional dual-drive Mach-Zehnder modulator", *Electronic Letters* **43**, 1039-1040 (2007).
- [8] J. Zhang, J. Yu, N. Chi, Z. Dong, X. Li, Y. Shao, J. Yu, L. Tao, "Flattened comb generation using only phase modulators driven by fundamental frequency sinusoidal sources with small frequency offset," *Opt. Lett.* **38**, 552-4 (2013).
- [9] M. Fujiwara, M. Teshima, J. Kani, H. Suzuki, "Optical Carrier Supply Module Using Flattened Optical Multicarrier Generation Based On Sinusoidal Amplitude and Phase Hybrid Modulation", *Journal of Lightwave Technology* **21**, 2705-2714 (2003).
- [10] K. Igarashi, K. Katoh, K. Kikuchi, K. Imai, M. Kourogi, "Generation of 10-GHz 2-ps optical pulse train over the C band based on an optical comb generator and its application to 160-Gbit/s OTDM systems," 34th *European Conference on Optical Communication*, Brussels, pp. 1-2, (2008).
- [11] Y. Dou, H. Zhang, M. Yao, "Generation of Flat Optical-Frequency Comb Using Cascaded Intensity and Phase Modulators," in *IEEE Photonics Technology Letters* **24**, 727-729 (2012).
- [12] G. Ducournau, Y. Yoshimizu, S. Hisatake, F. Pavanello, E. Peytavit, M. Zaknourne, T. Nagatsuma, J.F. Lampin, "Coherent THz communication at 200 GHz using a frequency comb, UTC-PD and electronic detection", *Electronics Letters* **50**, 386-388 (2014).
- [13] T. Saikai, T. Yamamoto, H. Yasaka and E. Yamada., "Flat-top Optical Frequency Comb Block Generation using InP-based Mach-Zehnder Modulator", in the 25th *International Conference on Indium Phosphide and Related Materials*, IPRM2013, Kobe, Japan, paper MoD3-3 (2013).
- [14] K. Ho, J. Kahn, "Optical frequency comb generator using phase modulation in amplified circulating loop," *Photonics Technol. Lett. IEEE* **5**, 721-725 (1993).
- [15] P. Shen, N. J. Gomes, P. A. Davies, P. Shillue, P. G. Huggard, B. N. Ellison, "Fiber ring based optical frequency comb generator with comb line spacing tuneability," *LEOS Summer Topical Meetings, IEEE* (2005).
- [16] N. Dupuis, C. R. Doerr, L. Zhang, L. Chen, N. J. Sauer, P. Dong, L. L. Buhl, D. Ahn, "InP-based comb generator for optical OFDM", *Journal of Lightwave Technology* **30**, 466-472 (2012).
- [17] P. Shen, N. J. Gomes, P. A. Davies, W. P. Shillue, "Generation of 2 THz Span Optical Comb in a Tunable Fiber Ring Based Optical Frequency Comb Generator", *Microwave Photonics*, 2007 *IEEE International Topical Meeting on*, Victoria, BC, 46-49 (2007).
- [18] OCLARO. <http://www.oclaro.com/technology/photonic-integration/>
- [19] J. Zhao, "Integrated Multi-Wavelength Transmitter using Filtered-Feedback", Thesis dissertation, The Netherlands (2013).
- [20] L. Ponnampalam, M. Fice, H. Shams, C. Renaud, A. Seeds, "Optical comb for generation of a continuously tunable coherent THz signal from 122.5 GHz to >2.7 THz," *Opt. Lett.* **43**, 2507-2510 (2018)

1. Introducción

Los generadores de frecuencias ópticas (OFCG, Optical Frequency Comb Generator) tienen varios campos de aplicación, como por ejemplo: espectroscopía, generación de THz, generación de forma de onda arbitraria óptica (O-AWG, optical arbitrary waveform generation), metrología, o filtros fotónicos de microondas [1, 2]. Además, son utilizados en comunicaciones ópticas como fuentes para transmisores en sistemas de multiplexación densa por división de longitud de onda (DWDM, Dense Wavelength Division Multiplexing) que explotan el gran ancho de banda de las fibras ópticas monomodo. [3, 4].



DWDM es una técnica de transporte que multiplexa varias señales sobre una sola fibra óptica mediante portadoras ópticas de diferente longitud de onda, incrementando la capacidad de los enlaces. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) ha definido el estándar G.692 para DWDM. [5]. Establece unas longitudes de onda o canales utilizables por los sistemas DWDM (la llamada 'rejilla ITU'), en la banda de 1550 nm. Dicha rejilla se especifica en frecuencia con espaciados de 100 GHz (equivalente a unos 0,8 nm) y espaciados de 50 GHz para sistemas con mayor densidad de canales. Un solo peine de frecuencias, potencialmente reemplaza a múltiples fuentes individuales de láseres, optimizando los sistemas.

El presente artículo tiene como objetivo describir y comparar las diferentes técnicas para conseguir OFCG usando moduladores electro-ópticos y presentar mediciones de los resultados experimentales de la generación de peines de frecuencias ópticas mediante circuitos fotónicos integrados (PIC, photonic integrated circuits).

La estructura del artículo es la siguiente: en la sección dos se describen las diferentes técnicas para generar peines de frecuencias ópticas mediante moduladores en cascada y a través de moduladores en anillo circulante. En la sección tres se presentan los resultados experimentales de la generación de peines de frecuencias mediante PIC con moduladores en anillo circulante. Finalmente, en la sección cuatro se presentan las conclusiones más relevantes.

2. Técnicas de generación de frecuencias ópticas mediante moduladores ópticos

Un generador de peines de frecuencias ópticas (OFCG), es una fuente óptica que genera un gran número de longitudes de onda, equiespaciadas en frecuencia y de igual amplitud, idealmente estando todas ellas enganchadas en fase; es decir, sincronizadas.

La diferencia en frecuencia entre dos modos o líneas adyacentes se conoce como espaciamiento (por ejemplo 0.08 nm, equivalente a 10 GHz, como se observa en la Fig. 1. Espaciamiento de frecuencias típicos logrados con OFCG en el estado del arte actual son de 6 a 20 GHz [6].

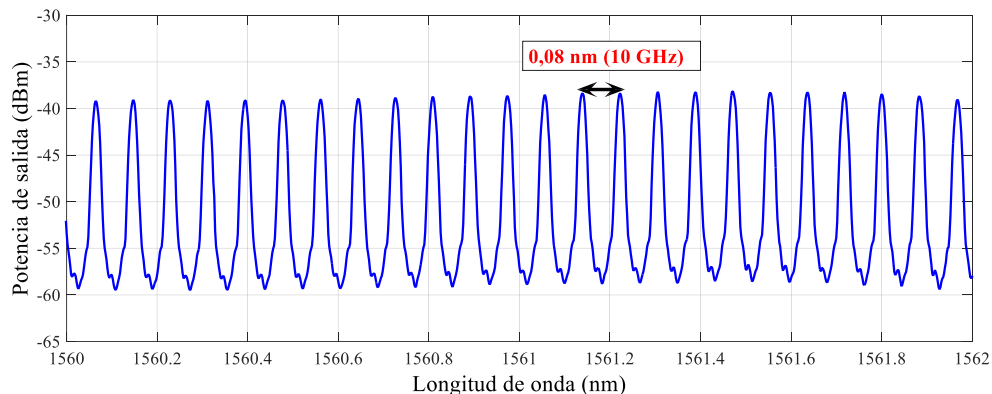


Fig.1. Peine de frecuencias ópticas con espaciamiento entre líneas de 0.08 nm.

Las técnicas más utilizadas para generar peines de frecuencias ópticas (OFCG) mediante moduladores son: a) moduladores en cascada, b) moduladores en anillo recirculante.

2.a. Peines de frecuencias ópticas mediante moduladores en cascada

Un modulador es un dispositivo que varía al menos un parámetro de una onda portadora, de acuerdo con una señal que contiene información. El modulador óptico varía la amplitud o la fase de la señal emitida por el láser semiconductor para transportar información; en consecuencia el modulador óptico puede ser de amplitud o de fase. Existen esquemas con moduladores ópticos de amplitud [7] y con moduladores ópticos de fase [8]. La diferencia principal en el uso de estos dos tipos de moduladores es que el de intensidad permite controlar la amplitud de las bandas laterales, para obtener un espectro plano. En cambio con los moduladores de fase, no necesariamente se logra la eualización de las amplitudes de los modos, ya que su función únicamente es expandir las bandas laterales, pero su potencia decrece rápidamente en los modos superiores [9].

El OFCG más básico se conforma con un solo modulador de fase electro-óptico (EOPM, Electro-optic phase modulator) colocado dentro de una cavidad Fabry-Perot con espejos de bajas pérdidas y alta reflectividad, como observamos en la Fig. 2 [10]. El láser de onda continua (CW) con frecuencia central (f_c) es modulado en fase a la frecuencia (f_m) por el EOPM. Mientras la luz hace múltiples viajes de ida y vuelta en el interior de la cavidad, se generan bandas laterales denominadas peine de frecuencias ópticas. En el dominio del tiempo, el peine óptico consiste de un set de dos trenes de pulsos intercalados a la tasa de repetición de (f_m).

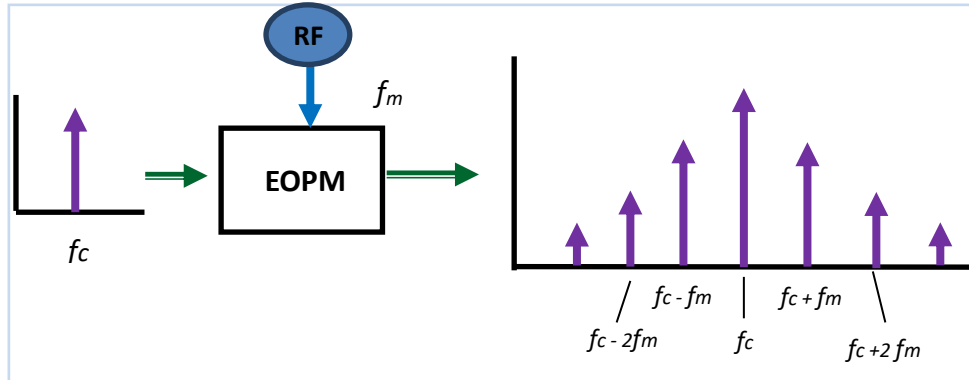


Fig.2. OFCG conformado por un modulador de fase electro-óptico (EOPM) colocado en una cavidad Fabry-Perot. Se observa el espectro de salida, que son bandas laterales en torno a la frecuencia central del láser de onda continua.

Al aumentar el número de moduladores de fase, se incrementa el número de líneas del OFCG [11]. En la Fig. 3 se muestra el esquema de un OFCG que utiliza dos moduladores de fase EOPM1 y EOPM2 [12]. El sintetizador genera una señal RF que ingresa a los moduladores y su frecuencia será la separación entre los modos del OFCG. También se requiere un desfasador (phase shifter) eléctrico ($\Delta\phi$), que sincroniza las señales y compensa el desfase que por variaciones térmicas se da en los moduladores.

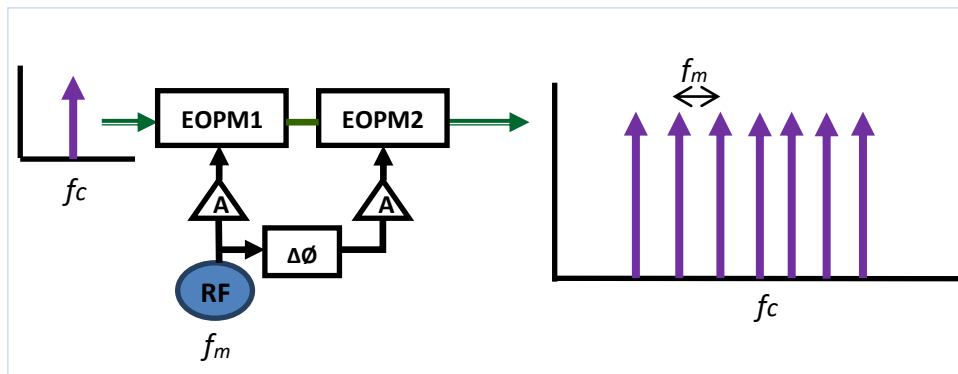


Fig.3. OFCG con moduladores de fase (EOPM1 y EOPM2); f_c es la frecuencia central del láser de onda continua; f_m es la señal de radiofrecuencia del sintetizador; A es un amplificador de RF y $\Delta\phi$ es un desfasador (phase shifter) eléctrico.

Las ventajas de la técnica de generación de peines mediante moduladores en cascada es la excelente planitud que se consigue (29 líneas @ 1.5 dB [13]) y que el espaciado entre modos depende de la frecuencia del generador, y es por tanto sintonizable. Las desventajas son las grandes pérdidas de inserción del modulador, el reducido ancho de banda (1.6 nm @ -30 dB [12]), así como que requieren un láser para producir la longitud de onda que se modula (láser semilla).

En cuanto a la geometría, las configuraciones con uno o varios moduladores ópticos puede ser lineal como los descritos en esta sección [9, 12] o en anillo [14]; y respecto a la implementación, hay dos tipos de ellas: peines de frecuencia con anillo de fibra óptica [15] y peines ópticos con circuitos integrados fotónicos (PIC, Photonic Integrated Circuit) [16].

2.b Peines de frecuencias ópticas mediante moduladores en anillo recirculante

En esta estructura [3], [14], el peine de frecuencias óptico se origina recirculando la longitud de onda de una fuente óptica semilla a través de un modulador de fase alimentado por un oscilador de radiofrecuencia (RF), generando bandas laterales alrededor de la semilla. Al recircular la salida, se crean nuevas bandas

laterales alrededor de las ya generadas. La estructura básica de este peine óptico que se muestra en la Fig. 4 incluye los siguientes elementos:

- Un modulador de fase (PM, phase modulator) que modula la luz de entrada para generar bandas laterales. La frecuencia de modulación RF (f_m) aplicada a este modulador es importante ya que debe coincidir con el espaciamiento de modos en el resonador anillo, lo que determina el espaciamiento del peine óptico.
- Una zona de ganancia proporcionada por la fibra dopada con erbio y acoplada con un sistema WDM a un láser de bombeo (λ_p); y
- Un acoplador a 3 dB para acoplar la señal de referencia del láser de entrada (λ_o) y la que circula por el anillo.

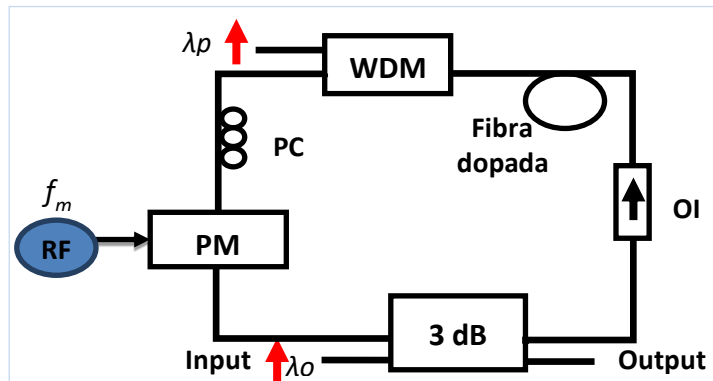


Fig.4. OFCG en anillo. La longitud de onda de una fuente óptica de entrada (λ_o), recircula en el anillo y es modulada por la señal (f_m) que alimenta el generador RF. La zona de ganancia es proporcionada por la fibra dopada con erbio y acoplada con un sistema WDM a un láser de bombeo (λ_p). La señal de entrada y la del anillo son combinadas por el acoplador de 3 dB. PC es el controlador de polarización, OI es el aislador óptico.

Experimentalmente se ha demostrado [4], [15], que la generación de peines basados en anillo de fibra óptica tienen gran ancho de banda ($> 1\text{THz}$) y pueden ser sintonizables en cuanto al espaciamiento entre modos en pasos de MHz [17], insertando en el interior del anillo una línea de retardo óptico ajustable (delay line) que permite una fina sintonización de la longitud de la cavidad. Sin embargo, sus desventajas son que se trata de estructuras discretas de grandes dimensiones, la longitud de la fibra que se necesita es larga (decenas de metros [6]) y las variaciones térmicas existentes que influyen en los dispositivos.

La mayor parte de las implementaciones de esta estructura de OFCG en anillo circulante son en fibra óptica, y muy recientemente se han comenzado a implementar en circuitos integrados fotónicos (PIC), cuyos elementos están integrados en un solo chip [16].

TABLA 1: Parámetros fundamentales de peines ópticos, generados con moduladores en anillo recirculante. - Seed: láser semilla, PM: modulador de fase, MZI: Interferómetro Mach Zehnder.

Estructura	Ancho de banda del peine				Espaciamiento entre líneas	Ancho de línea (FWHM)	Ref.
	1 dB	3 dB	6 dB	10 dB			
seed+PM / fibra óptica				14.8 nm (1.8 THz), @40 dB	18 GHz	No medido	[3]
seed+PM / fibra óptica		5nm	8nm (1 THz)		6 - 12.5 GHz, (sintonizable en pasos de 12.5 MHz)	No medido	[6]
seed+PM / fibra óptica				16 nm (2 THz)	6 - 12 GHz, (sintonizable en pasos de 12.5 MHz)	< 10 KHz	[17]
seed+MZI / PIC				0.64 nm (80GHz)	10 GHz	500 KHz	[16]

En la tabla 1 se presentan los parámetros de peines ópticos medidos en diversas estructuras con moduladores en anillo recirculante. Podemos observar que para el caso de anillos con fibra óptica se logran grandes anchos de banda (16 nm @ -10 dB [17]).

3. Resultados experimentales: Peines de frecuencias ópticas mediante circuito integrado fotónico, con moduladores en anillo recirculante.

La fotografía del circuito fotónico diseñado que conforma el generador de peines de frecuencias ópticas (OFCG) totalmente integrado se muestra en la Fig. 5. El chip contiene una estructura en anillo, con longitud de cavidad de 8000 μm y frecuencia de repetición, $f_{\text{rep}} = 10$ GHz.

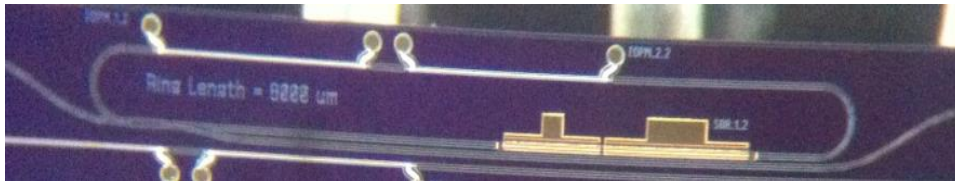


Fig.5. Fotografía del generador de peine de frecuencias ópticas, en configuración anillo. Chip de 6x2 mm.

3.a. Descripción del dispositivo: OFCG con moduladores de fase y láser semilla externo (10 GHz).

El circuito integrado fotónico dispone de los siguientes bloques funcionales estándares (building blocks), que se describen en el manual de diseño de la plataforma genérica de integración de OCLARO Tech. [18]:

a) Dos moduladores de fase electro-ópticos (EOPM), de 1000 μm de longitud cada uno. Basados en trabajos experimentales descritos en el manual, esta longitud es recomendada para lograr una eficiente modulación a altas frecuencias (~ 10 GHz) y bajos voltajes de polarización (< 5 voltios) [19]. Además, se usan dos moduladores para conseguir un mayor número de líneas del peine óptico y por lo tanto, para aumentar su ancho de banda [11]:

b) Una zona de ganancia conformada por un SOA (Semiconductor Optical Amplifier) de 750 μm de longitud, establecida mediante un típico grupo de curvas de ganancia modal versus longitud de onda y densidad de corriente de inyección, que presenta el manual de diseño de la plataforma genérica de integración.

c) Una guía de onda pasiva con control de fase (WPS, Weak Waveguide with phase control), de 500 μm de longitud, que permite el cambio del índice de refracción (desplazamiento de fase), a través de la inyección de corriente. El manual de diseño de la plataforma define curvas que relacionan la variación del índice de refracción así como las pérdidas (cm^{-1}), respecto a la corriente/unidad de longitud ($\text{mA}/\mu\text{m}$), para definir la longitud del WPS. Este elemento se encarga de la sintonización fina de la fase de la señal que se genere.

La longitud total de la cavidad es 8000 μm , que hemos calculado para conseguir un peine óptico con espaciamiento de frecuencia de 10 GHz.

El esquema de este anillo se muestra en la Fig. 6. La estructura tiene dos accesos que permiten inyectar el láser externo y observar la potencia óptica de salida por el otro extremo.

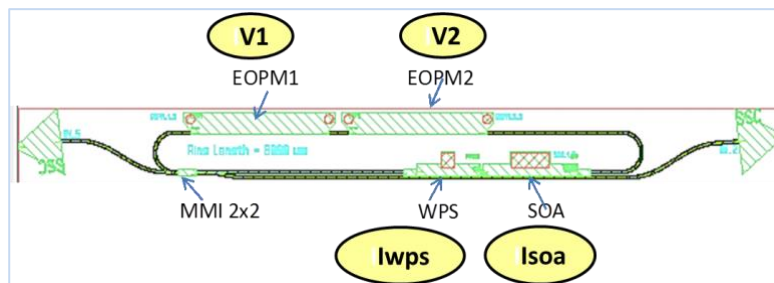


Fig.6. Estructura del anillo OFCG con láser semilla externo, con dos EOPMs, un SOA, un WPS y un acoplador MMI. - V1, V2: voltajes de polarización inversa. - Iwps, Isoa: corriente en el WPS y SOA.

3.b. Resultados de la caracterización experimental.

Para las mediciones se utiliza el setup indicado en la figura 7. Una fibra con lente que incluye además un aislador óptico (OI, Optical isolator) se usa para acoplar la luz de salida de la guía del chip. El aislador es

seguido por un divisor de potencia (splitter) de relación 90/10, dividiendo la potencia óptica de salida en dos brazos. La salida de 10% se conecta al Medidor de Potencia (PM, Power Meter) que provee una medida constante de la potencia óptica generada. El otro brazo, con 90% de división, se utiliza para conectar a los diferentes instrumentos de medida.

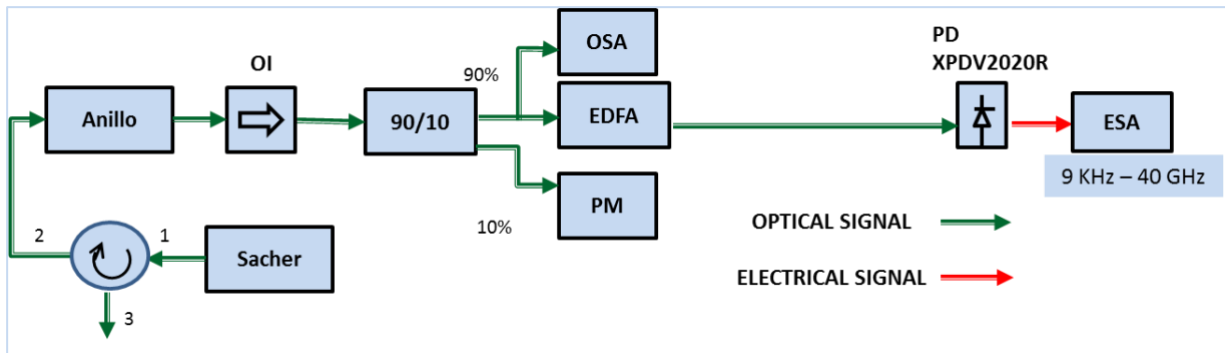


Fig.7. Setup para mediciones en estructura anillo con láser externo sintonizable (Sacher). OI: Aislador Óptico. OSA: Analizador de Espectro Óptico. EDFA: Amplificador de fibra dopada de erbio. PM: medidor de potencia. PD: fotodiodo modelo XPDV2020R. ESA: Analizador de Espectros Eléctrico.

Para observar el espectro óptico se usa el analizador de espectros (OSA, optical spectrum analyzer) con 0.02 nm de resolución. Además, la señal es amplificada por un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA, Erbium Doped Fiber Amplifier), modelo Nortel telecom FA14UFAC, y se inyecta en un fotodiodo (modelo XPDV2020R) para la conversión optoelectrónica, siendo registrada la señal eléctrica en un analizador de espectros (ESA), con rango de 9 KHz a 40 GHz.

Por otra parte, se utiliza un láser sintonizable tipo cavidad extendida, marca Sacher Technike, con potencia de emisión de hasta 200 mW, rango de longitud de onda de 1530 -1570 nm y ancho espectral (linewidth) < 1 MHz. El láser semilla que se usa en un OFCG debe tener un estrecho ancho espectral óptico [15]. La luz emitida por el láser externo sintonizable (Sacher) ingresa al anillo del PIC, a través de un circulator, que cumple la función de aislador evitando reflexiones. El anillo tiene dos accesos que permiten inyectar el láser externo y observar la potencia óptica de salida por el otro extremo, conforme a la fotografía que se muestra en la Fig. 8.

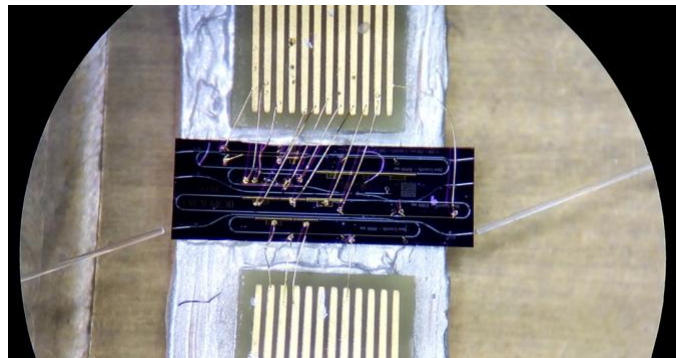


Fig.8. Fotografía de la estructura de anillo con dos EOPMs, un SOA y un WPS en el interior del PIC, con dos fibras ópticas de acceso.

Las corrientes y tensiones se inyectan a través de una punta multi-contacto, de doce terminales (Microtech EP-12-250), cuyo montaje se visualiza en la Fig. 9. La luz que emite el láser es extraída a través de guías de onda de salida, inclinada 7° respecto al borde del chip, con el objetivo de minimizar las reflexiones. En la sección del SOA se inyecta corriente y se mide la potencia de salida. Las secciones de EOPM y WPs se conectan a tierra.

La curva LI (Potencia óptica - Corriente eléctrica) obtenida se muestra en la Fig. 10, incluyendo además los espectros que se consiguen en diferentes rangos de corriente en el SOA (Isoa), en sentido horario (CW, clockwise) y antihorario (CCW, counter clockwise), al incrementar la corriente hasta la saturación del anillo. También se realizan las mediciones en sentido de subida (up) y de bajada (down), al aumentar o disminuir los pasos de corriente, para observar el funcionamiento del láser. La potencia óptica de salida en el láser

corresponde a la emisión espontánea amplificada (ASE, amplified spontaneous emission) en el SOA, restando las pérdidas en la cavidad y en las guías de onda.

Este anillo de 10 GHz presenta un comportamiento como láser monomodo ($\lambda = 1541.6$ nm) hasta una $I_{soa} = 45$ mA. Para corrientes superiores $I_{soa} > 45$ mA, el espectro tiene la forma de un peine óptico. La corriente umbral es $I_{th} = 18$ mA.

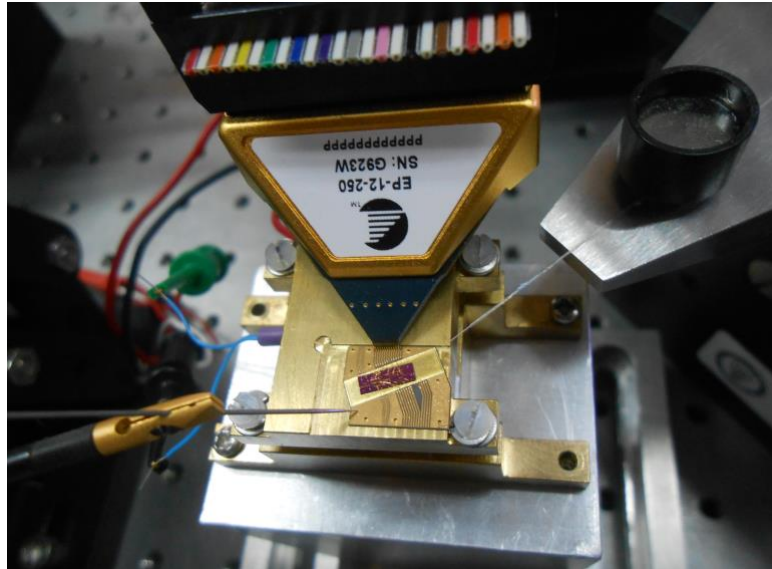


Fig.9. Fotografía del montaje del PIC, utilizando una punta multi-contacto, de doce terminales (Microtech EP-12-250)

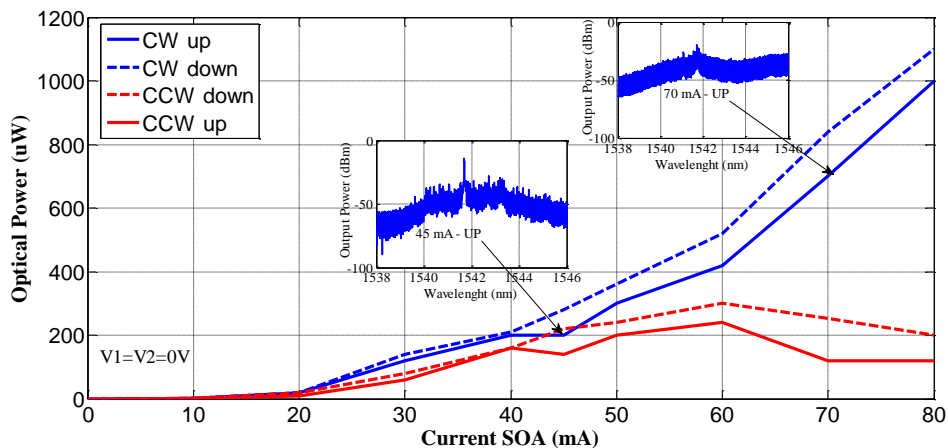


Fig.10. Curva LI del anillo, en sentido de subida (up) y de bajada (down), y en sentido horario (CW) y antihorario (CCW).- $I_{wps} = 0$ mA. $V1 = V2 = 0$ V.

Para extraer el espectro óptico se inyecta la señal del láser monomodo externo (láser semilla) con los siguientes valores: potencia de salida = 1 dBm, longitud de onda = 1541.6 nm que corresponde a zona de ganancia del anillo. Se realiza un minucioso ajuste de las condiciones de polarización de los elementos del anillo para lograr el mayor ancho de banda del espectro. Los moduladores EOPM fueron polarizados en forma inversa con voltajes $V1 = V2 = -2.5$ V e $I_{soa} = 80$ mA. El espectro óptico normalizado respecto al mayor nivel de potencia obtenido se muestra en la figura 11 y una ampliación del mismo en el rango de 1544 y 1550 nm, con el objetivo de estimar la planitud del peine óptico, se presenta en la figura 12.

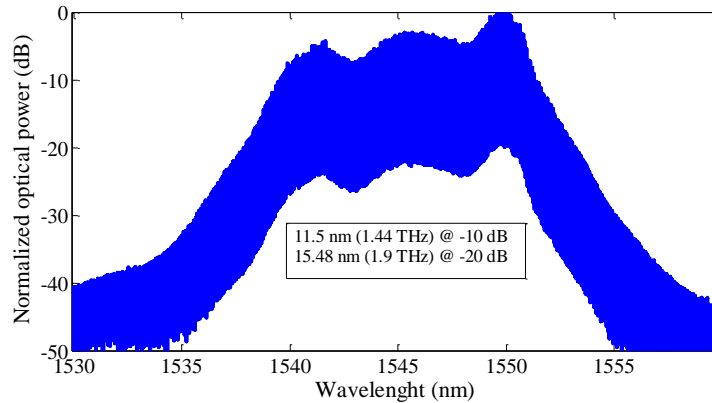


Fig.11. Peine óptico obtenido con moduladores y láser semilla. El ancho de banda es de 11.5 nm (1.44 THz) @ -10dB y 15.48 nm (1.9 THz) @ -20dB. Isoa=80 mA, V1=V2= -2.5V.

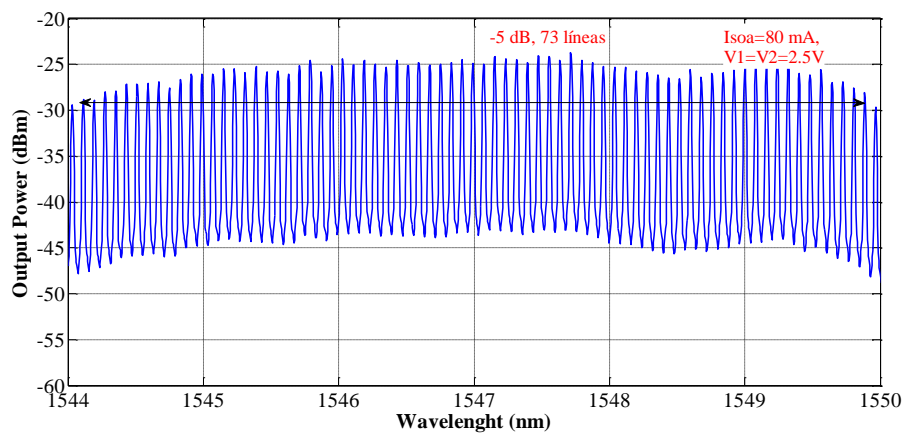


Fig.12. Planitud del peine óptico obtenido con 73 líneas @ -5dB y 10.17 GHz de separación intermodal. Isoa=80 mA, V1=V2= -2.5V.

El peine óptico obtenido tiene un rango (span) de 11.5 nm (1.44 THz) @ -10 dB y 15.48 nm (1.9 THz) @ -20 dB; con separación intermodal de 10.17 GHz. No es totalmente plano puesto que tiene una evidente variación en la intensidad de los modos; se ha estimado una planitud de 73 líneas @ -5 dB, en las mejores condiciones de medición. Estos valores de ancho de banda y de planitud son equiparables a los resultados del estado del arte actual en cuanto a generación de peines ópticos, en los que se ha logrado anchos de banda alrededor de 2 THz [4, 17, 20]. También observamos un incremento de líneas espectrales y ecualización del espectro cuando varía la polarización de los EOPM. Por ejemplo, mencionamos el aumento de 59 a 73 líneas, por la variación de la polarización de $V=-0.5V$ a $V=-2.5$.

4. Conclusiones

Diseñamos un generador de frecuencias ópticas basado en moduladores de fase electro-ópticos, totalmente integrado, que incluye internamente un láser semilla de emisión monomodo (DBR). Para nuestro conocimiento, por primera vez se realizan mediciones en este tipo de estructuras integradas.

Fabricamos el chip en una plataforma estándar, el cual contiene un anillo, cuya característica es la capacidad de generar peines a tasas de repetición de 10 GHz.

El peine óptico obtenido es de 11.5 nm (@ -10 dB). Este parámetro es equiparable a resultados obtenidos con dispositivos OFCG con anillo de fibra óptica. Además, se concluye que los moduladores electro-ópticos influyen en la planitud del peine y en la cantidad de líneas generadas (ancho de banda).

Dada la importancia de los OFCG en diferentes aplicaciones, es fundamental continuar con investigaciones teóricas y experimentales sobre el comportamiento y funcionamiento de estos generadores de frecuencias ópticas.