Non-linear characterization of SOA and wavelength converter based on SOA-MZI

Caracterización de no linealidades de SOA y conversor de longitud de onda basado en SOA-MZI

José Antonio Altabás^(*,E), Félix Sotelo, Miguel Cabezón, Ignacio Garcés^(S)

Grupo de Tecnologías Fotónicas (I3A), Universidad de Zaragoza, Campus Río Ebro, Ed. I+D+i, C/Mariano Esquilor s/n, Zaragoza 50018, Spain.

(*) Email: jaltabas@unizar.es

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Received / Recibido: 20/09/2013. Revised / Revisado: 13/11/2013. Accepted / Aceptado: 14/11/2013.

DOI: <http://dx.doi.org/10.7149/OPA.46.4.353>

ABSTRACT:

This article is a study of the non-linear phenomena, XPM (cross phase modulation) and XGM (cross gain modulation) in SOAs (semiconductor optical amplifiers). The analysis of the nonlinear effects allows us to design a wavelength converter based on Mach-Zehnder interferometer with SOA in its arms (SOA-MZI). This type of system is important in all-optical signal processing due to it can produce the inverse signal and the non-inverse signal at the desired wavelength. This device has been simulated to analyse its performance and made by discrete components showing it is viable and improvable through integration.

Key words: Semiconductor Optical Amplifier, Cross-Phase Modulation, Cross-Gain Modulation, Non-linear, Wavelength Converter, Optical Logic, Logic Gates.

RESUMEN:

En este artículo se realiza el estudio de los fenómenos no linealidades, XPM (modulación de fase cruzada) y XGM (modulación de ganancia cruzada), en SOAs (amplificadores ópticos de semiconductor). El análisis de los efectos no lineales permite el diseño de un conversor de longitud de onda basado en un Interferómetro Mach-Zehnder con SOAs en sus brazos (SOA-MZI). Este tipo de sistema es importante para el procesamiento todo óptico debido a que es capaz de producir tanto la señal inversa como la señal no inversa en la longitud de onda deseada. El dispositivo ha sido simulado para analizar su comportamiento y realizado mediante elementos discretos mostrando que es viable y mejorable mediante la integración.

Palabras clave: Amplificadores Ópticos de Semiconductor, Modulación de Fase Cruzada, Modulación de Ganancia Cruzada, No Lineal, Conversor de Longitud de Onda, Lógica Óptica, Puertas Lógicas.

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1]. R. Rostan, M. H. A. Washid, S. A. A. Rais, M. F. Faridus, "The effect of signal repetition rate, injected current and switching window on cross-phase modulation in SOA-NOLM", *Proceedings of IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics - RSM*, pp. 373–376 (2011).
- [2]. K. Vysokinos, P. Bakopoulos, D. Fitsios, T. Alexoudi, D. Apos-tolopoulos, H. Avramopoulos, A. Miliou, N. Pleros, "All-optical T flip-flop using a single SOA-MZI and a feedback loop", *Proceedings of European Conference and Exhibition on Optical Communication - ECOC*, pp. 1–3 (2011).
- [3]. J.-Y. Kim, J.-M. Kang, T.-Y. Kim y S.-K. Han, "10 Gbit/s all-optical composite logic gates with XOR, NOR, OR and NAND functions using SOA-MZI structures", *Electron. Lett.* **42**, 303–304 (2006). [DOI](https://doi.org/10.1049/el:2006100)

^E Durante el desarrollo del trabajo, el autor José Antonio Altabás era estudiante de la titulación de Ingeniería de Telecomunicación de la Universidad de Zaragoza (España).

- [4]. S. Kumar, A. E. Willner, "Simultaneous four-wave mixing and cross-gain modulation for implementing an all-optical XNOR logic gate using a single SOA", *Opt. Express* **14**, 5092–5097 (2006). [DOI](#)
- [5]. M. J. Connelly, *Semiconductor Optical Amplifiers*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (2004).
- [6]. M. Cabezón, A. Villafranca, J. J. Martínez, D. Izquierdo, I. Garcés, "Integrated multi-bit all-optical NOR gate for high speed data processing", *J. Lightwave Technol.* **31**, 1178–1184 (2013). [DOI](#)

1. Introducción

En los últimos años se ha producido un incremento exponencial del tráfico de datos, lo que ha provocado el aumento de las tasas de datos utilizadas en las redes troncales. Esto se ha podido llevar a cabo mediante el uso de nuevas técnicas de multiplexación y de comunicaciones ópticas coherentes. El aumento de la tasa de transmisión de datos está encontrando una importante limitación en el procesamiento electrónico de las señales enviadas, ya que los dispositivos electrónicos no pueden alcanzar las velocidades de procesamiento requeridas y es necesario recurrir a la paralelización.

Para eliminar este cuello de botella surgido en torno al procesamiento eléctrico de las señales, se han comenzado a desarrollar sistemas que permitan el procesamiento de las señales ópticas sin necesidad de pasar al dominio eléctrico. Los amplificadores ópticos de semiconductor (SOA) se han perfilado como elementos adecuados para realizar este procesamiento todo óptico [1,2]. Gracias a las no linealidades presentes en estos SOA se puede realizar distintas operaciones sobre señales ópticas como por ejemplo operaciones lógicas [3,4].

Antes de utilizar las no linealidades de los SOA es necesario analizar las características de las mismas en función de las señales que van a interaccionar. Para ello se va a estudiar el comportamiento de la modulación de ganancia cruzada (XGM) y de la modulación de fase cruzada (XPM) en un SOA en función de algunas características de las señales que provocan y se ven afectadas por estas no linealidades [5]. Después de conocer correctamente el comportamiento del SOA, se puede utilizar el mismo para desarrollar de forma correcta distintos dispositivos que permitan eliminar las limitaciones que el procesamiento eléctrico impone sobre las comunicaciones ópticas.

La posibilidad de realizar puertas lógicas todo ópticas entronca con el proyecto PEGASO

[6], el cual busca el desarrollo de matrices de puertas lógicas ópticas utilizando amplificadores ópticos de semiconductor que permitan realizar el procesamiento óptico de señales ópticas. El proyecto PEGASO se basa en la creación de elementos lógicos básicos (BLE) compuestos por una tabla de verdad o look-up table (LUT) de 4 bits, y la interconexión de estos elementos.

Para poder realizar la LUT de 4 bits es necesario disponer de las 4 entradas y de sus negadas. Cada señal puede coincidir en longitud de onda con su negada pero no con el resto para hacer posible la realización de NOR de 4 bits mediante un SOA [6]. La combinación de las distintas NOR posibles ante estas entradas, permite la creación de un LUT completamente funcional.

Para asegurar la escalabilidad de un sistema basado en estos dispositivos se propone un conversor en longitud de onda que produzca tanto la salida directa de la señal como la inversa en la misma longitud de onda. Así se minimizan el número de longitudes de onda dentro del BLE y se aísla de las longitudes de onda externas.

2. Caracterización de SOA

En esta sección se muestran la caracterización de las dos no linealidades de interés del SOA: XGM y XPM. Estos dos procesos no lineales presentes en los SOAs son producidos por las variaciones del número de portadores presentes en la zona activa.

El proceso de XGM está basado en la reducción del número de portadores de forma óptica, y por tanto de la ganancia del SOA. Esta reducción de portadores es producida por la amplificación de una señal intensa (señal de bombeo) que provoca que otra señal de control (sonda) no pueda ser amplificada y toma las características temporales del bombeo en su amplitud.

Fig. 1. Montaje para la medida de XGM del SOA. DFB: "Distributed Feedback Laser", TLS: "Tuneable Laser Source", MZM: "Mach-Zehnder Modulator", VDL: "Variable Delay Line", SOA: "Semiconductor Optical Amplifier", WDM: "Wavelength DeMultiplexor".

El proceso de XPM es debido a que la disminución del número de portadores provoca cambios en índice de refracción del SOA y por tanto provoca cambios en la fase de las señales ópticas que viajan por él. De forma similar a la XGM, la señal de bombeo varía el número de portadores del SOA y por lo tanto provoca cambios en la fase de la señal de control haciendo que su fase siga el comportamiento temporal de la amplitud del bombeo.

2.1 XGM, modulación cruzada de ganancia

El análisis del comportamiento de la supresión de la ganancia del SOA o XGM se lleva a cabo mediante el estudio de la potencia de salida de una señal modulada RZ, de longitud de onda λ_{probe} , señal de control; la cual interactuará con otra señal, de longitud de onda λ_{pump} , que modulará la ganancia de la primera, señal de bombeo. La señal que hará de sonda es una señal de tipo reloj donde todos sus bits son 1, esto para una modulación tipo RZ es un tren de pulsos. Así como la señal de bombeo esta modulada con un patrón aleatorio de datos a 10Gbps. El montaje realizado para caracterizar la XGM se muestra en la Fig. 1.

Debido a las curvas de recuperación de los SOAs debemos tener en cuenta que las señales de bombeo y control no deben entrar al mismo tiempo, sino que existe un retardo optimo. De este modo en la Fig. 2 se muestra el comportamiento de la supresión de ganancia (diferencia entre el nivel alto y el nivel bajo de la señal de salida) en función de cómo varía el retardo que hay entre las dos señales que viajan a través del SOA. Este retardo es tomado positivo cuando la señal de bombeo llega antes que la de control.

En la Fig. 2 se observa que la diferencia de potencia entre el nivel alto de la salida (nivel bajo del bombeo) y el nivel bajo de la salida (nivel alto de bombeo) tiene su máximo cuando la señal de bombeo llega unos 20 ps antes que la señal de control.

La aparición del máximo de supresión de la ganancia en un valor de retardo positivo se debe a que el XGM no es un proceso instantáneo y

Fig. 2. Comportamiento de la supresión de la potencia de salida en función del retardo entre dos señales RZ para distintos valores de potencia del bombeo, P_{pump} .

Fig. 3. Supresión de la potencia de salida en función de la diferencia entre la potencia de bombeo y la de control, P_{pump} y P_{probe} , respectivamente, para distintos valores de P_{pump} .

Fig. 4. Montaje para la medida de XPM del SOA. DFB: "Distributed Feedback Laser", TLS: "Tuneable Laser Source", MZM: "Mach-Zehnder Modulator", SOA: "Semiconductor Optical Amplifier", WDM: "Wavelength DeMultiplexor", BOSA: "Brillouin Optical Spectrum Analyzer".

para que la depleción de los portadores alcance el nivel deseado es necesario que transcurra un tiempo después de que la señal de bombeo llegue. Además, el proceso de depleción y de recuperación de los portadores no es simétrico temporalmente, sino que el tiempo de recuperación es mayor que el de depleción. Por lo tanto, aunque la señal de bombeo salga del SOA antes que la de control la recuperación de portadores en el SOA no será lo suficientemente rápida como para sacar al SOA del punto de XGM deseado.

La Fig. 3 muestra el comportamiento de XGM en función de la relación de potencia que hay entre la señal de bombeo y la señal de control.

Podemos observar en la Fig. 3 como el cambio en la fase de la señal de salida depende esencialmente de la diferencia de potencias entre bombeo y sonda. Así pues se observa que la diferencia de potencia de los ceros y unos es muy semejante para los valores de bombeo medidos. Esto se debe a que el reparto de portadores entre las dos señales se mantiene constante.

2.2 XPM, modulación cruzada de fase

Para la caracterización del XPM se propone un montaje experimental semejante al propuesto para la caracterización experimental del XGM. La imagen del esquema se muestra en la Fig. 4. La inyección de las dos señales se realiza en un esquema copropagante, del mismo modo que para las medidas de XGM, la señal de control es una señal continua y la señal de bombeo es una señal con modulación NRZ. Las longitudes de onda utilizadas son las mismas que se usaron en el caso del XGM, para poder llevar a cabo una comparativa entre los dos experimentos.

En la Fig. 5 se presenta la diferencia de fase provocada por XPM en función del P_{pump} para varios P_{probe} .

En la Fig. 5 se observa que el aumento de la potencia del bombeo lleva asociado un incremento de la fase relativa de la señal de control. Esto se debe a que cuando aumentamos la potencia del bombeo, se utilizan más portadores en la amplificación del bombeo y por lo tanto se incrementa la variación en el índice de refracción del medio por el que viaja la de control. Estos mayores cambios en el índice de refracción conllevan un mayor desfase en la sonda respecto a cuando el bombeo no está presente. También se ve que cuando aumentamos la señal de control de potencia es necesario aumentar en mayor medida el bombeo para conseguir el mismo desfase, ya que un mayor número de portadores son también utilizados en la amplificación de la sonda y el bombeo tiene menos margen para modificar el índice de refracción respecto de cuando no está presente.

Fig. 5. Variación en la fase de una señal en función de la potencia de la señal de bombeo para varios valores de potencia de la sonda, P_{probe} .

3. Conversor de longitud de onda

El conversor de longitud de onda se basa en un SOA-MZI simétrico. Este SOA-MZI ha sido construido mediante dos acopladores 50-50, los cuales introducen un desfase de $\pi/2$ en la señal acoplada y de 0 en la señal directa. En uno de los brazos del SOA-MZI se acopla la señal de bombeo mediante un divisor Y. Esta inyección se realiza mediante un esquema contra-propagante, es decir la señal del bombeo viaja a través del SOA en la dirección opuesta a la sonda. La idea del diseño se presenta en la Fig. 6.

Las salidas S e I del conversor de longitud de onda siguen las Ecs. (1) y (2):

$$P_S = \frac{P_{probe}}{2} (G_1 + G_2 + 2\sqrt{G_1 G_2} \cos(\phi_{XPM})), \quad (1)$$

$$P_I = \frac{P_{probe}}{2} (G_1 + G_2 + 2\sqrt{G_1 G_2} \cos(\phi_{XPM} + \pi)), \quad (2)$$

donde P_{probe} es la potencia de entrada de la señal de control, G_1 y G_2 son los valores de la ganancia de los SOAs 1 y 2, respectivamente, y ϕ_{XPM} es el valor del desfase introducido por la presencia del bombeo en el SOA1. Eligiendo la relación de potencias adecuada entre el bombeo y el control podemos conseguir un desfase entre los dos brazos de π . Podemos pues realizar una relación en función de los valores de potencia del bombeo con lo que obtenemos una estimación de los resultados esperados a las salidas. Esta estimación se muestra en la Tabla I.

Debido a que los efectos no lineales de XGM y XPM son no separables, se producirá una contracción de la ganancia en el brazo del SOA1.

por tanto llamamos G_{11} a la ganancia que tendríamos en ese brazo en el momento en que entra un 1 y G_{10} en el caso de un 0. En la Tabla I podemos observar que las salidas serán complementarias, lo cual se debe a que el desfase entre los dos brazos es de π cuando el bombeo se encuentra en su nivel de potencia alto (P_1) y 0 cuando este se encuentra a nivel bajo (P_0).

Fig. 6. Esquemático del conversor de longitud de onda, donde P_{probe} es la señal de control y P_{pump} es la señal de bombeo.

3.1 Simulación del conversor de longitud de onda

Se han realizado simulaciones con el programa *VPI Transmission Maker 8.7* para partir de unos resultados preliminares con los cuales llegar a un montaje experimental con elementos discretos. Se han realizado simulaciones tanto para modulaciones de retorno a cero (RZ) como para modulaciones de no retorno a cero (NRZ).

En el caso de la modulación RZ se han seleccionado como tasas de bit $R = 10$ Gbps, $R = 20$ Gbps y $R = 40$ Gbps. Mientras que para el caso de modulación NRZ se tomaron las tasas de bit $R = 2.5$ Gbps, $R = 10$ Gbps y $R = 20$ Gbps. Las potencias de las señales bombeo y control se han seleccionado para obtener un desfase de π entre los dos brazos del SOA-MZI, se toman, por tanto y atendiendo a la relación de la Fig. 5, $P_{pump} = 0$ dBm y $P_{probe} = -6$ dBm.

Table I
Calculo teórico de las dos salidas del conversor de longitud de onda.

$n \in \mathbb{Z}$	$P_{pump} = P_1, \phi_{XPM} = (2n + 1)\pi$	$P_{pump} = P_0, \phi_{XPM} = 2n\pi$
P_S	$\frac{P_{probe}}{2} (G_{11} + G_2 - 2\sqrt{G_{11} G_2}) \rightarrow 0$	$\frac{P_{probe}}{2} (G_{10} + G_2 + 2\sqrt{G_{10} G_2}) \approx 2P_{probe} G_2$
P_I	$\frac{P_{probe}}{2} (G_{11} + G_2 + 2\sqrt{G_{11} G_2}) \rightarrow 2P_{probe} G_2$	$\frac{P_{probe}}{2} (G_{10} + G_2 - 2\sqrt{G_{10} G_2}) \approx 0$

Fig. 7. Simulación del BER de la salida inversa del convertor de longitud de onda para modulación RZ en función de la tasa de datos del bombeo. Diagrama de ojo para $R = 10$ Gbps (abajo izquierda). Diagrama de ojo para $R = 20$ Gbps (arriba derecha).

Fig. 9. Simulación del BER de la salida inversa del convertor de longitud de onda para modulación NRZ en función de la tasa de datos del bombeo. Diagrama de ojo para $R = 10$ Gbps (abajo izquierda). Diagrama de ojo para $R = 2.5$ Gbps (arriba derecha).

Fig. 8. Simulación del BER de la salida no inversa del convertor de longitud de onda para modulación RZ en función de la tasa de datos del bombeo. Diagrama de ojo para $R = 10$ Gbps (abajo izquierda). Diagrama de ojo para $R = 20$ Gbps (arriba derecha).

Fig. 10. Simulación del BER de la salida no inversa del convertor de longitud de onda para modulación NRZ en función de la tasa de datos del bombeo. Diagrama de ojo para $R = 10$ Gbps (abajo izquierda). Diagrama de ojo para $R = 20$ Gbps (arriba derecha).

Para realizar el análisis del comportamiento del sistema propuesto ante estas dos modulaciones y para las distintas tasas de bit, se van a mostrar las curvas de tasa de error en el bit (BER) en función de la relación señal a ruido (SNR), además de algunos diagramas de ojo representativos de las señales sin ruido blanco gaussiano adicional.

En las Figs. 7 y 8, se puede observar las gráficas de BER para la modulación RZ y los diagramas de ojo para tasas de bit de $R = 10$ Gbps y de $R = 20$ Gbps, tanto para salida inversa como la no inversa. El retardo seleccionado entre el bombeo y la sonda ha sido optimizado según la tasa de datos empleada, siendo $\tau = 25$ ps para $R = 10$ Gbps, $\tau = 20$ ps para $R = 20$ Gbps y $\tau = 12.5$ ps para $R = 40$ Gbps.

En las Figs. 7 y 8 se observa que para $R = 10$ Gbps y $R = 20$ Gbps el sistema funciona correctamente. Cuando se incrementa la tasa de datos hasta $R = 40$ Gbps el sistema comienza a tener mayores tasas de error, especialmente en el caso de la señal inversa. Esto se debe a que la dinámica del SOA-MZI no es capaz de seguir los cambios temporales en la amplitud de la señal a tasas de datos tan altas. En los diagramas de ojo mostrados en estas gráficas se ve una gran apertura de los mismos, lo cual reafirma las tasas de error bajas observadas en los casos de $R = 10$ Gbps y $R = 20$ Gbps.

Para el sistema con modulación NRZ se pueden ver las gráficas de BER en las Figs. 9 y 10 para la salida inversa y para la no inversa. Además, se observan los diagramas de ojo para tasas de bit de $R = 2.5$ Gbps y $R = 10$ Gbps para las dos salidas. Las potencias de las señales

bombeo y control elegidas son iguales a las utilizadas en el caso de la modulación RZ, $P_{pump} = 0$ dBm y $P_{probe} = -6$ dBm, ya que deseamos obtener el mismo desfase de π entre los brazos del conversor de longitud de onda. Estos parámetros son los mismos que se han utilizado en las Figs. 11 y 12 mostradas más adelante.

Observando las Figs. 9 y 10, se puede ver que la utilización de la modulación NRZ provoca un empeoramiento del sistema con respecto al uso de la modulación RZ. En los diagramas de ojo vemos que la principal causa de este empeoramiento es la aparición de *jitter* en las transiciones entre datos, lo que hace que el diagrama de ojo se cierre y por tanto empeore la tasa de error. Este *jitter* se debe a la dinámica asimétrica que muestran los fenómenos de depleción y recuperación de los portadores de los SOAs, así como por el efecto memoria que se produce en el SOA debido a la existencia de intervalos largos en los que la potencia del bombeo se encuentra en el mismo nivel.

Como último aporte de la simulación del sistema se va a mostrar las formas de onda de las señales obtenidas con el conversor de longitud de onda con modulación NRZ para las tasas de datos de $R = 2.5$ Gbps y $R = 10$ Gbps para poder compararlas con las señales obtenidas mediante el montaje experimental con elementos discretos del conversor de longitud de onda. Estas formas de onda se muestran en las Figs. 11 y 12.

En el caso de la salida inversa o *S* se observa que el estado bajo no alcanza el 0. Esto es debido a que la inyección del bombeo en uno de los dos brazos desbalancea el SOA-MZI, ya que el fenómeno de XPM no es separable de la compresión de ganancia. Observando el estado bajo de la salida no inversa, podemos observar ciertos lóbulos, esto es debido principalmente a que como antes el SOA-MZI esta desbalanceado.

3.2 Resultados experimentales

A la vista de los resultados simulados y de lo esperado teóricamente podemos trasladar todo esto a un montaje experimental discreto. El experimento se ha llevado a cabo sobre una mesa óptica con fibras monomodo como

Fig. 11. Forma de onda simulada $R = 2.5$ Gbps.

Fig. 11. Forma de onda simulada $R = 10$ Gbps.

conexión entre elementos, debido a ello los brazos del MZI tenían una longitud de 8 m lo cual dificultaba la estabilidad del mismo. El test experimental del sistema solo se ha realizado con modulación NRZ, ya que al tener un ancho de banda menor que la modulación RZ es más sencillo conseguir que la diferencia de longitud de los brazos entre dentro de la longitud de coherencia de la fuente. El montaje está definido en la Fig. 13.

Con el osciloscopio se tomaron las tramas de bits para las mismas tasas de bits que se realizaron las simulaciones de la forma de onda, $R = 2.5$ Gbps y $R = 10$ Gbps. Al igual que en las simulaciones se tuvo en cuenta la relación de potencias ideal para obtener un desfase de π , que tanto para $R = 2.5$ Gbps como para $R = 10$ Gbps, y estas eran $P_{pump} = 0$ dBm y $P_{probe} = -6$ dBm.

El sistema interferómetro montado mediante elementos discretos y fibras es altamente inestable, además de que presenta una enorme cantidad de ruido, que no puede promediarse

Fig. 13. Montaje discreto de un convertor de longitud de onda. DFB: "Distributed Feedback Laser", TLS: "Tuneable Laser Source", MZM: "Mach-Zehnder Modulator", SOA: "Semiconductor Optical Amplifier", WDM: "Wavelength DeMultiplexor", VDL: "Variable Delay Line", PC: "Polarization Control".

Fig. 14. Forma de onda experimental $R = 2.5$ Gbps.

Fig. 11. Forma de onda experimental $R = 10$ Gbps.

debido a la citada inestabilidad. Observando las Figs. 14 y 15 se puede ver que el sistema está produciendo las dos salidas, tanto la inversa como la no inversa. También, se puede ver que la existencia del XGM desbalancea la potencia de los dos brazos y por tanto la interferencia que se produce no es completa y aparecerán variaciones en los niveles de cero y uno. El nivel

bajo es mayor que cero, lo cual se debe a que la interferencia que se produce en el sistema no es ideal debido a diferencias entre polarización de los brazos del SOA-MZI, así como por el ASE producido por los SOAs que se suma sin interferir a la salida del sistema.

Además, comparando la Fig. 11 con la Fig. 14 y la Fig. 12 con la Fig. 15, se observa que las señales producidas en el sistema experimental tienen un comportamiento muy similar que las señales simuladas, una de las principales diferencias esta relacionada con la potencia de salida, en las simulaciones no se han incluido pérdidas que tiene el sistema real además de que los SOAs reales tienen una potencia de emisión máxima o de saturación. Esto nos permite confirmar el acuerdo entre simulación y montaje experimental, y por lo tanto confirmar la funcionalidad del sistema y su viabilidad como sistema integrado.

4. Conclusiones

El objetivo ha sido diseñar un convertor de longitud de onda que produzca dos señales de salida a la misma longitud de onda, teniendo en una los mismos datos que la señal a convertir y en la otra los datos negados.

Se ha efectuado la caracterización no lineal de un SOA. Esta caracterización ha consistido en estudiar XGM y XPM en función de la potencia de las señales que la producen. Estos procesos están ligados, es decir, que cuando se produce

uno de ellos también ocurre el otro. Esto afecta significativamente al conversor debido a que el XGM desbalancea el SOA-MZI. Además, se ha estudiado como afecta la relación temporal o retardo entre las señales de bombeo y control en el comportamiento de XGM, ya que es crucial en el caso de utilizar la modulación RZ.

La realización de un conversor de longitud de onda con dos salidas (inversa y no inversa) mediante un SOA-MZI se muestra viable. Esto se ha observado mediante la simulación del sistema con modulaciones RZ y NRZ, y su testeo mediante elementos discretos con modulación NRZ.

Mediante la simulación hemos observado el mejor comportamiento del sistema utilizando la modulación RZ, debido a que los efectos de memoria entre los bits desaparecen. Esto nos permite alcanzar tasas de datos de $R = 20$ Gbps en modulación RZ con bajas tasas de error, mientras que en modulación NRZ se dan tasas de error superiores.

El montaje del sistema con elementos discretos se ha mostrado altamente inestable, tal y como cabía esperar de SOA-MZI realizado con elementos discretos. Por ello, para solucionar la inestabilidad del SOA-MZI se ha diseñado el sistema integrado.

En conclusión, con este proyecto se mejora la escalabilidad del proyecto PEGASO y se abren nuevas vías de experimentación, que comienzan con el análisis experimental del sistema integrado y continuarán con el estudio de mejoras de este sistema.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado en parte con fondos del Ministerio de Economía y Competitividad bajo el proyecto TEC2010-19418, con fondos del Ministerio de Educación, Cultura y Deporte bajo una beca de colaboración en la Universidad de Zaragoza y con fondos del Gobierno de Aragón.