

# Propuesta y verificación experimental de una red de paquetes ópticos con nodos de intercambio de etiqueta y conmutación en longitud de onda basados en el efecto XGM en amplificadores de semiconductor

## Proposal and experimental assessment of label swapping and wavelength conversion through XGM in semiconductor amplifiers in an OPS networks

Juan José MARTÍNEZ<sup>(1)</sup>, Asier VILLAFRANCA<sup>(1)</sup>, Miguel CABEZÓN<sup>(1)</sup>, Alicia LÓPEZ<sup>(1)</sup>, Ignacio GARCÉS<sup>(1)</sup>

1. Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones, Centro Politécnico Superior, Universidad de Zaragoza, PT Walqa, Ed.1, Ctra Zaragoza N330a, km, 566, 22197 Cuarte (Huesca).

Persona de contacto: Juan José MARTÍNEZ ([jjosemar@unizar.es](mailto:jjosemar@unizar.es)).

### RESUMEN:

En esta comunicación se ha propuesto una arquitectura sencilla para un nodo situado dentro de una red óptica de conmutación de paquetes. Dicho arquitectura implementa características de intercambio de etiquetas así como de conversión de longitud de onda, ambas funcionalidades obtenidas mediante la utilización de amplificadores ópticos de semiconductor (SOAs) y el aprovechamiento de uno de sus fenómenos no lineales (XGM). Posteriormente se ha verificado el funcionamiento de dicho nodo así como la correcta implementación del intercambio de etiquetas.

**Palabras clave:** SOA, XGM, Intercambio de etiquetas, Conversión de longitud de onda, Conmutación óptica de paquetes.

### ABSTRACT:

In this paper, the architecture for a node inside a packet switching network has been depicted. This architecture implements functionalities of label swapping as well as wavelength conversion, both characteristic accomplished by the use of semiconductor optical amplifiers (SOAs) and one of their non-linear effects (XGM, cross gain modulation). Afterwards, the feasibility of the node and the proper implementation of the label swapping have been asserted.

**Key words:** SOA, XGM, Label Swapping, Wavelength Conversion, Optical Packet Switching

## 1.- Introducción

Las redes ópticas de próxima generación (tanto troncales como metropolitanas o de acceso) plantean la conmutación óptica de paquetes (OPS, optical packet switching), donde la información es encapsulada en paquetes ópticos separados, como el principal salto tecnológico con respecto a las actuales

redes con conmutación de circuitos mediante portadoras ópticas. Esta tecnología tiene un importante potencial para agilizar y flexibilizar notablemente el tratamiento de los datos, reduciendo el coste de operación de la red y aumentando su capacidad en número de usuarios.

Uno de los aspectos primordiales de esta tecnología reside en que la información conmutada de forma completamente óptica en cada uno de los nodos que conforman la red, sin necesidad de conversión electro-óptica. Para conseguir este tipo de enrutamiento transparente a la propia información es necesario añadir a cada paquete los datos necesarios para que llegue a su destino; estos datos se denominan etiquetas y se pueden incorporar a la señal óptica de diversas formas [1,2]; una de las formas más comunes (denominada etiquetado ortogonal) utiliza dos esquemas de modulación diferentes independientes para codificar la información a transmitir (payload) y la etiqueta (label). En nuestro caso proponemos utilizar modulación en intensidad (IM) introducida mediante un modulador externo para el payload y modulación en frecuencia (FSK) introducida en el propio láser [3]. Para evitar degradaciones asociadas a la penalización que impone el ajuste de la doble modulación, adicionalmente se propone utilizar técnicas de corrección de errores (Forward Error Correction, FEC) en la detección de tráfico y payload [4].

Sin embargo, el incremento en complejidad tecnológica de las redes de conmutación de paquetes, el simple etiquetado no es suficiente, y para la aplicación de conmutación de paquetes WDM así como para el enrutamiento dinámico de los mismos, es necesario poder cambiar la etiqueta a un determinado paquete, así como su longitud de onda, sin necesidad de alterar la información de payload que transporta [5].

Una forma completamente óptica y sencilla de implementar estas capacidades consiste en aprovechar el fenómeno XGM (Cross-gain modulation) presente en los amplificadores ópticos de semiconductor.

## 2.- Fundamento teórico XGM

El XGM es un efecto que se debe a la variación del número de portadores en la zona activa de un amplificador de semiconductor. Una señal que llegue al SOA con suficiente potencia puede acaparar los portadores, saturando así la ganancia y evitando que el resto de señales sean amplificadas. De la misma forma, cuando esa señal desaparece, quedan

libres portadores que vuelven a amplificar el resto de señales. Estos cambios afectarán a todas las señales de entrada y dependen del tiempo de vida de los portadores [6].

El ejemplo más sencillo que ilustra el XGM consiste en inyectar simultáneamente a la entrada del SOA una señal continua de baja potencia denominada señal prueba (longitud de onda  $\lambda_1$ ) y una señal más potente (bombeo, en  $\lambda_2$ ) modulada en intensidad. La XGM hará que, a la salida, la señal de  $\lambda_1$  aparezca también modulada igual que la de  $\lambda_2$  (pero negada); lo que además implica que el amplificador está actuando como un conversor de longitud de onda [7,8].

Sin embargo, inyectar la señal de bombeo en sentido contrario (puesto que los SOAs son dispositivos bi-direccionales), tiene el mismo efecto sobre la señal de entrada. La diferencia es que en este caso no se necesitará un filtro si se desea separar las señales, además permite el uso de la misma longitud de onda para bombeo y prueba.

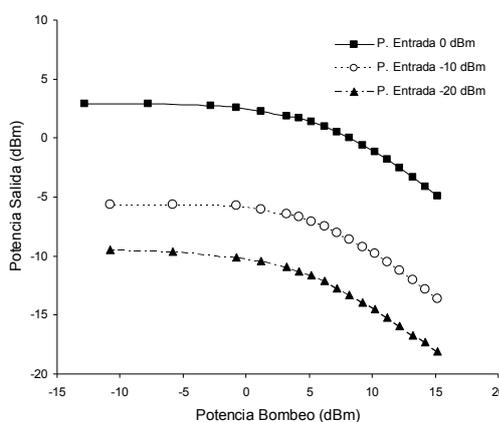


Fig. 1: Efecto de XGM en un SOA

La figura 1 muestra este comportamiento en nuestro SOA, en el eje X la potencia de bombeo y en el eje Y la potencia de salida que obtenemos para las potencias de entradas continuas (cada curva). Se observa un comportamiento similar para las diferentes potencias de entrada, y se puede determinar que en torno a los 10 dBm de bombeo tenemos la máxima excursión en la salida.

En nuestro caso este efecto se utiliza haciendo que la señal original sea la de bombeo (con label FSK y payload IM) y que la señal de entrada sea una nueva (solo con el

label FSK nuevo y situada en la longitud de onda a la que se desee cambiar). De esta forma la nueva señal pasa a tomar la modulación IM de la de bombeo (negada) manteniendo el nuevo label, ya que el efecto XGM no afecta a la modulación FSK, por lo que el label viejo es borrado (no se traslada a la nueva longitud de onda). Además, si se utiliza para la señal de entrada una fuente que permita sintonizar en longitud de onda, además del intercambio de etiquetas podemos realizar la conversión a cualquier longitud de onda.

### 3.- Descripción del experimento

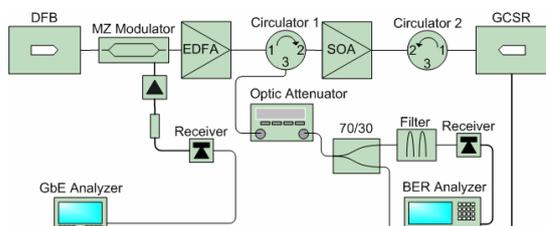


Fig. 2: Esquemático del montaje utilizado en el experimento

La figura 2 muestra el montaje del experimento para el nodo de red propuesto. El láser DFB (longitud de onda 1556.09 nm) se utiliza como fuente de bombeo, para ello a la señal óptica generada se le aplica payload IM mediante un modulador externo MZ. La modulación escogida Gigabit Ethernet (1.25 Gbps), un formato habitual en redes de comunicaciones ópticas. La señal así conformada se amplifica mediante un EDFA (para alcanzar el punto óptico de 10 dBm visto en la figura 1) y se inyecta al SOA como señal de bombeo.

Por otra parte, al láser GCSR (longitud de onda variable, situada para el experimento en 1548.82 nm) se le aplica una señal FSK mediante la modulación de su etapa de fase de forma que obtenemos una separación entre picos de aproximadamente 1.25 GHz. La modulación aplicada es una modulación CMI (PRBS de longitud  $2^{15}-1$ ) a una tasa de 156 Mbps (312 Mbps efectivos al ser un formato RZ de modulación). Esta señal se utiliza como señal de entrada al SOA que será conformada en amplitud por la señal de bombeo.

El SOA se sitúa entre dos circuladores que permiten aislar las señales en cada sentido.

Finalmente, en la parte dedicada a la detección de las dos señales se sitúa primero un atenuador óptico variable para controlar la potencia que llega a los receptores, a continuación un divisor 70/30 (la salida del 70% se utiliza para la FSK al ser un camino más crítico en potencia). La detección del label FSK se realiza mediante un filtro demodulador, que suprime uno de los dos picos de frecuencia, transformando la modulación FSK en una de intensidad que puede ser directamente detectada. La detección del payload IM no requiere ningún tratamiento adicional para ser llevada a cabo.

### 4.- Resultados

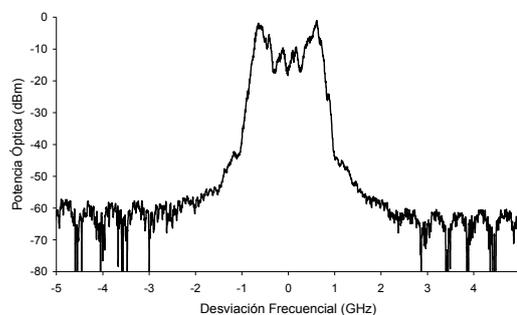


Fig. 3: Señal FSK del GCSR, centrada en 1548.82 nm

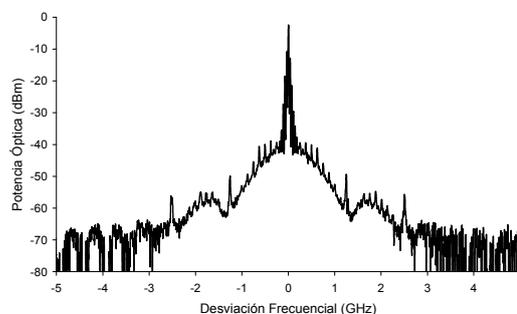


Fig. 4: Señal IM del DFB tras el modulador MZ, centrada en 1556.09 nm

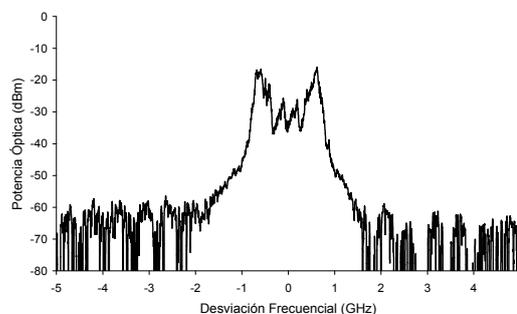


Fig. 5: Señal a la salida 3 del circulador 1, IM y FSK, centrada en 1548.82 nm

En el experimento existe un compromiso en la profundidad de modulación que se aplica en el MZ: un extinction ratio (ER) elevado en la IM aumenta el efecto XGM, facilitando la transferencia de la modulación en intensidad y mejorando la detección; pero también perjudica a la modulación FSK, haciendo que el filtrado de detección tenga más elementos no deseado, afectando negativamente a la recepción. En este caso, y puesto que la detección de FSK es bastante más crítica que la de IM, se ha escogido una profundidad de modulación baja para la intensidad, que daña lo menos posible a la FSK, a la vez que permite funcionar correctamente a la XGM y a toda la etapa de payload.

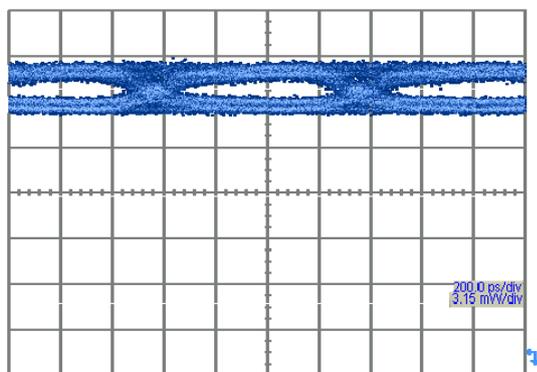


Fig. 6: Diagrama de ojo óptico a la salida 3 del circulator 1

Las consecuencias de esta elección se pueden ver en las figuras 3, 4 y 5; donde se pueden ver diferentes espectros ópticos de las señales del experimento. La figura 3 muestra el espectro de la señal FSK generada en el GCSR, la figura 4 muestra una modulación IM pura a la salida del modulador MZ tras el DFB. Finalmente la figura 5 muestra el espectro de la señal combinada por XGM que tenemos a la entrada de la etapa de detección. Se puede apreciar que en la señal combinada apenas se distingue la modulación en intensidad y que predomina la FSK.

Esto se puede ver más claramente en el diagrama de ojo de la figura 6 (misma señal que el espectro de la figura 5), donde se pueden ver los niveles de la modulación en intensidad (baja profundidad de modulación tras la conversión,  $ER = 0.55$  dB) y superpuestos a estos se pueden apreciar las pequeñas variaciones de potencia óptica asociadas a la modulación de frecuencia presente en el ojo.

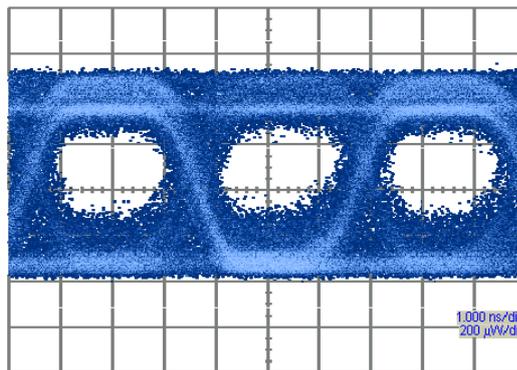


Fig. 7: Diagrama de ojo óptico de la señal FSK tras ser demodulada por el filtro

Finalmente en la figura 7 tenemos el ojo de la señal FSK una vez demodulada donde se puede ver que, a pesar de tener residuos de la modulación en intensidad sobre el nivel del 1, la elección de una baja profundidad de modulación para el payload permite obtener un ojo suficientemente abierto para la recepción.

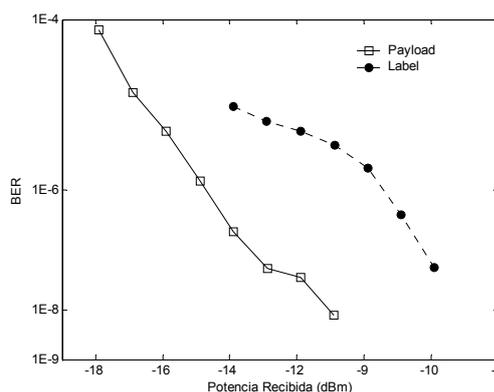


Fig. 8: Tasa de error en bits de la detección de label y payload, frente a la potencia óptica a la entrada del filtro y del detector (respectivamente).

Para verificar el correcto funcionamiento de esta técnica de conversión de longitud de onda e intercambio de etiquetas se comprueba la tasa de error en recepción de label y payload. Para estas medidas se ha añadido una modulación sobre la intensidad de bias del DFB (generando una modulación FSK gracias al chirp adiabático del láser) de esta forma ambos láseres portan una etiqueta y se puede comprobar como en el SOA la información de frecuencia de la señal de bombeo no es trasladada a la señal del GCSR, borrando efectivamente la etiqueta vieja. Los resultados obtenidos se pueden ver en la fi-

gura 8, donde se puede apreciar que la recepción del label es bastante peor que la del payload (camino más crítico), por otra parte, el descenso en la potencia recibida penaliza más a la modulación en intensidad que a la modulación en frecuencia; como se había previsto la elevada penalización en la recepción de ambas señales hace recomendable utilizar conjuntamente con esta técnica un sistema de corrección de errores (FEC).

## 5.- Conclusiones y futuros desarrollos

Se ha demostrado la viabilidad del efecto XGM presente en los amplificadores de semiconductor como modo de realizar un nodo de intercambio de etiquetas y conversión de longitud de onda para una red de conmutación de paquetes. Además se ha propuesto una arquitectura de diseño de nodo que con un único SOA y una fuente sintonizable (en este caso un láser GCSR) permite conseguir las dos funcionalidades deseadas con un diseño simple y efectivo. Finalmente se ha verificado el funcionamiento de la arquitectura propuesta.

En futuros desarrollos de esta arquitectura incluyen sustituir el SOA actual por uno diseñado especialmente para aprovechar los efectos no lineales, lo cual aumentaría el rendimiento de la XGM, haciendo necesaria una potencia de bombeo menor, consiguiendo diseños más eficientes y sencillos de integrar. Adicionalmente, mejorar el rendimiento de la modulación FSK permitirá una detección menos crítica y con menores penalizaciones que el diseño actual, consiguiendo tasas de error en detección que harán innecesarias la utilización de técnicas FEC. Finalmente, las características de un SOA no lineal permiten extender la transmisión de la modulación de amplitud a más altas frecuencias, haciendo posibles diseños a mayores tasas de transmisión de payload.

*Agradecimientos:* Los autores desean expresar su agradecimiento a la DGA por los fondos destinados a la investigación en el Parque Tecnológico Walqa, a la Cátedra Telefónica por la financiación a través del proyecto 284262, así como a la UPC por proporcionar parte del material empleado en el experimento.

## Referencias

- [1] D. J. BLUMENTHAL, B. OLSSON, G. ROSSI, T. E. DIMMICK, L. RAU, "All-optical label swapping networks and technologies", *J. Lightwave Technol.*, vol. 18, n. 12, pp. 2058-2075, 2000.
- [2] J. J. VEGAS-OLMOS, I. T. MONROY, A. M. J. KOONEN, Y. YU, "High bit-rate combined FSK/IM modulated optical signal generation by using GCSR tunable laser sources", *Opt. Express*, vol. 11, pp 3136-3140, 2003.
- [3] A. LÓPEZ, I. GARCÉS, M. A. LOSADA, J. J. MARTÍNEZ, A. VILAFRANCA, J. A. LÁZARO, "Narrow-fsk optical packet labeling scheme for optical ethernet networks", *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 18, no. 16, pp. 1696-1698, 2006.
- [4] W. D. GROVER, "Forward error correction in dispersion-limited lightwave systems" *J. Lightwave Technol.*, vol. 6, pp. 643-654, 1988.
- [5] S. L. DANIELSEN, B. MIKKELSEN, C. JOERGENSEN, T. DURHUUS, K.E. STUBKJAER, "WDM Packet Switch Architectures and Analysis of the Influence of Tuneable Wavelength Converters on the Performance" *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, pp. 219-228, 1997.
- [6] M. CONNELLY, "Semiconductor Optical Amplifiers", Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [7] T. DURHUUS, B. MIKKELSEN, C. JOERGENSEN, S. L. DANIELSEN, K. E. STUBKJAER, "All optical wavelength conversion by SOAs", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 14, No. 6, JUNE 1996.
- [8] D. A. O. DAVIES, "Small-Signal Analysis of Wavelength Conversion in Semiconductor Laser Amplifiers via Gain Saturation", *IEEE Photonics Technology Letters*, VOL. 7, NO. 6, JUNE 1995.