

MODELO COMPUTACIONAL APLICADO A LA RESPUESTA EN FRECUENCIA DE UN AMPLIFICADOR ÓPTICO DE SEMICONDUCTOR

O. Pérez-Cortés^{1,*}, O. López-Ortega¹, H. Gómez-Pozos¹, T.V. K. Karthik²

¹Área Académica de Computación y Electrónica, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo
obed_perez@uaeh.edu.mx, lopezo@uaeh.edu.mx, hpozos@uaeh.edu.mx

²Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo
krishnakarthik.tv@gmail.com

* Autor de correspondencia: obed_perez@uaeh.edu.mx

RESUMEN

En este trabajo se utiliza un modelo global para determinar la respuesta en frecuencia de un sistema de señalización binaria a octal; tal sistema tiene como elemento central un Amplificador Óptico de Semiconductor (AOS). El sistema de señalización mapea la información de tres señales binarias ópticas (entrada) a la amplitud de otra señal también óptica (salida). Se emplean datos experimentales reportados en otros trabajos, y por medio de *splines* de tercer orden se determinan los niveles de la señal de salida en función de la frecuencia de las señales de entrada. De esta manera se hacen predicciones sobre el comportamiento de una señal óptica que se propaga por un dispositivo semiconductor a partir de datos experimentales.

Palabras Clave: Amplificador óptico de semiconductor, procesamiento de la información en el dominio óptico, modulación cruzada de la polarización, modelos físicos, modelos computacionales.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de técnicas computacionales se ha extendido a diferentes áreas de la ciencia y resuelve muchas problemáticas sociales como de seguridad [1], alimenticias [2], del medio ambiente [3], de salud [4], o bien en las ciencias naturales como la física [5], química [6], u otras emergentes como la bioinformática [7]. En dichas ciencias y problemáticas son empleados uno o varios de los seis dominios de las técnicas computacionales, a saber: sistemas de información y *WEB* (SIW), adquisición de datos (AD), integración de datos (ID), métodos estadísticos (ME), sistemas de información geográficos (SIG), sistemas de soporte de decisión (SSD). Uno o más de estos interactuando simultáneamente para dar origen a software de simulación, de pre/post procesamiento, etcétera. Diferentes estudios demuestran que el uso de *software* de simulación en la investigación presenta un incremento sostenido en diversas áreas como la física de partículas (AD y ID), la dinámica atmosférica (SIW), la medicina (AD, ID), el *marketing* (ME), etcétera [8]. Algunas de estas áreas del conocimiento no cuentan con formalismos bien establecidos, por lo que resulta inevitable el uso de técnicas de minería de datos para explicar algún fenómeno de interés [9]. En otros casos, a pesar de contar con modelos físicos de un fenómeno de interés no se cuenta con todos los elementos del mismo, o bien la solución de la misma debe determinarse por métodos numéricos, como el caso de la ecuación de Schrödinger [10]. En el caso en que exista un modelo que tenga solución exacta a algún fenómeno, usualmente esta es bajo condiciones muy específicas. En la práctica, dichas condiciones son difíciles, o bien imposibles de satisfacer. Tal es el caso de los semiconductores empleados en aplicaciones de telecomunicaciones. Por ejemplo, en el caso de propagación simultánea de más de una señal óptica se generan señales dentro de

un AOS que deberían considerarse en las ecuaciones de los modelos de propagación. Sin embargo, usualmente son ignoradas porque la teoría indica que se genera un número infinito de estas.

Los AOS son dispositivos semejantes a un láser semiconductor, excepto que carecen de cavidad resonante. Están constituidos por la unión de tres películas semiconductoras, dos extrínsecas y una intrínseca, en alguna arquitectura particular, como la *risco*, y son bombeados de manera eléctrica. El uso de estos en aplicaciones como las telecomunicaciones ha adquirido un auge enorme. Esto es porque los AOS permiten implementar funciones requeridas por las redes de telecomunicaciones ópticas en los denominados circuitos fotónicos [11]. Para poder emplearlo en el diseño de dichas funcionalidades debe contarse que un modelo que tome en cuenta todas las posibles variables involucradas, en cualquier escenario posible. Sin embargo, lo anterior es imposible en la práctica debido a que el número de variables que deben considerarse es enorme (y quizá desconocido). Además de que no se sabe de antemano cuál es su función en un sistema dado. Entonces, al no contar con dicho modelo, en este trabajo se propone describir el comportamiento del AOS en una configuración particular empleando modelos globales. Específicamente, a partir de datos experimentales se determinó la respuesta en frecuencia de un AOS por medio de un modelo global de *splines* de tercer orden.

En este contexto, el AOS es empleado en un sistema de señalización binaria a octal. El sistema de señalización mencionado tiene como finalidad codificar la información de tres señales ópticas digitales binarias en la amplitud de otra señal óptica. Tal función se esquematiza en la figura 1.

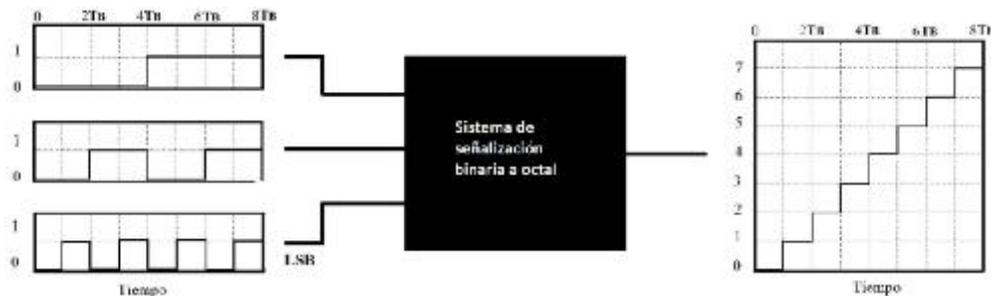


Figura 1. Representación de la función de señalización binaria a octal. La información de tres señales es codificada en la amplitud de otra señal.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El objetivo del presente trabajo es desarrollar un modelo que determine la respuesta en frecuencia de un sistema de señalización binaria a octal. Tal sistema tiene tres señales digitales ópticas de entrada y una señal de salida digital y óptica. Las señales de entrada varían en el tiempo a escalas del orden de nano segundos (ver las fluctuaciones en el tiempo representadas en las gráficas de la izquierda de la figura 1, siendo T_B del orden de 10^{-9} segundos).

La base de este trabajo son dos estudios teóricos-experimentales que se reportan en [12] y [13]. El primero reporta valores experimentales del valor de la rotación del estado de polarización de una señal que se propaga por el AOS para ciertos valores de la frecuencia de modulación de dicha señal. En el segundo se presenta el diseño e implementación de un sistema de señalización, cuya funcionalidad es idéntica a la descrita al final de la sección 1. Los resultados de este último son válidos únicamente para una frecuencia de modulación de las señales de entrada.

El uso de la técnica computacional de modelo global permite hacer predicciones sobre los posibles resultados experimentales que pudieran obtenerse si se realizara el experimento reportado en [13] para

un rango amplio de frecuencia de las señales de entrada. Si bien existen modelos teóricos que describen parte de la dinámica física que ocurre en el AOS, estos no consideran todos los fenómenos que se suscitan en este. De manera que al partir de datos experimentales del AOS, para el fenómeno de interés, se espera que las predicciones tengan un mayor grado de precisión con la ventaja de que se obtendrían a partir de ecuaciones muy simples.

Para cumplir el objetivo planteado, en primer lugar, se propone la ecuación 1 que proporciona cada uno de los ocho diferentes niveles de salida del sistema de señalización para cada una de las entradas.

$$N_i = f(d)g(v), \quad (1)$$

donde: f y g son funciones; d representa la entrada al sistema de señalización en decimal (0-7) y v es la frecuencia de modulación de dicha entrada. En la figura 2 se representan de manera esquemática cada uno de estos parámetros. En el modelo planteado $g(v = 5 \text{ GHz}) = 1$. Es importante apuntar que la amplitud máxima, N_7 , está dada por la máxima rotación del estado de polarización de la señal al propagarse por el AOS, según lo reportado en [11].

En segundo lugar, partiendo de los resultados experimentales de [12] y por medio del modelo global mencionado anteriormente, se determinó la función $g(v)$ que predice el valor de la rotación del estado de polarización de una señal que se propaga por el AOS. Tal función predice el comportamiento del AOS para cualquier valor de frecuencia de modulación de las señales de entrada al sistema de señalización en el rango 1-100 GHz. De acuerdo con [13] el comportamiento de la señal de salida del sistema de señalización está dictada por completo por el AOS.

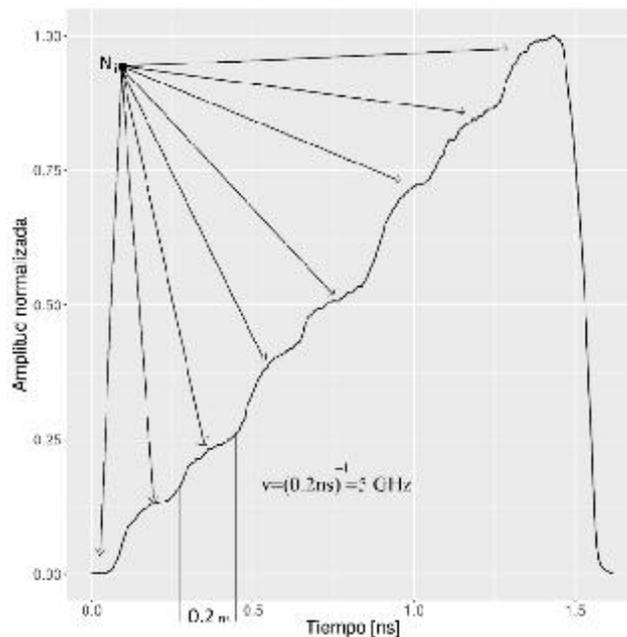


Figura 2. Esquema de la salida del sistema de señalización adaptado de “All-Optical Binary-to-Octal Encoder Based on a Semiconductor Optical Amplifier: Application to Eight-Level ASK Signaling” de Pérez-Cortés *et al*, 2013, Microwave and optical technology letters, vol. 55 Issue 6, pp 1316-132.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Usando los datos que se muestran en la Figura 2 se encontró que la función $f(d)$ de la ecuación 1 está dada por la ecuación 2. Debe tomarse en cuenta que la frecuencia de modulación de la señal es de 5 GHz.

$$f(d) = -0.031 + 0.147d. \quad (2)$$

A su vez se determinó la función $g(\nu)$ de manera numérica, ésta adquiere diferentes valores dependiendo de la frecuencia de las señales de entrada al sistema de señalización. La Figura 3 muestra el perfil de la función $g(\nu)$ encontrada con el modelo de *splines* de tercer orden.

Posteriormente, se calculó la diferencia entre niveles: $\Delta = N_j - N_i, \forall j > i \in (0, 7)$. Este valor es afectado por la función $g(\nu)$ de manera directamente proporcional. De acuerdo a la fenomenología que se reporta en [12] el valor de la rotación del estado de polarización disminuye conforme la frecuencia de modulación de la señal de entrada al AOS. De modo que el valor Δ disminuirá proporcionalmente, provocando que el perfil mostrado en la figura 2 se comprima en el eje de las abscisas. Con todos estos datos se calculó el comportamiento de la separación entre niveles, Δ , en el dominio de la frecuencia en el intervalo 1 GHz – 100 GHz y se muestra en la figura 3.

El perfil mostrado en la figura 3 corresponde a la fenomenología del AOS reportada en [12]. A frecuencias bajas ~ 1 GHz la rotación del estado de polarización producido por el AOS es la mayor, por lo que la separación entre niveles Δ es la mayor posible. Conforme la frecuencia se incrementa se presenta una caída abrupta alrededor de 5 GHz, y finalmente se alcanza un valor de saturación a partir de 20 GHz, aproximadamente. En la figura 3 se muestra el valor correspondiente de la separación de niveles a 5 GHz, que corresponde al valor experimental reportado en [13]. Para determinar cada uno de los niveles de salida del sistema de señalización a cierta frecuencia ν el procedimiento consiste en: calcular el valor $g(\nu)$, después multiplicarlo por el resultado de la ecuación 2 que resulta del sustituir el valor del nivel que se desea conocer (d). De acuerdo a lo reportado en [12] la respuesta en frecuencia del valor de la rotación del estado de polarización de una señal que se propaga por un AOS está determinada por la dinámica de la interacción luz-materia. Por un lado, las transiciones interbanda tienen un efecto dominante a bajas frecuencias y su efecto disminuye debido a que el tiempo de vida de los portadores en estados excitados es del orden de 10 ns. Esto provoca que las variaciones en potencia de una señal tengan poco o nulo efecto en la cantidad de transiciones intrabanda. Por otra parte, las colisiones interbanda ocurren a tiempos del orden de 10 fs, el tiempo de trayectoria libre media. Son estas las que contribuyen con un valor constante a la rotación del estado de polarización de la señal en un rango de valores de 1 GHz hasta aproximadamente 60 GHz. Entonces, en el modelo planteado, en la función $g(\nu)$ se cuantifican los efectos de los fenómenos interbanda e intrabanda. Esto significa que por medio de un modelo computacional se predice el comportamiento de dos fenomenologías que ocurren en los AOS como el empleado en [12] y [13].

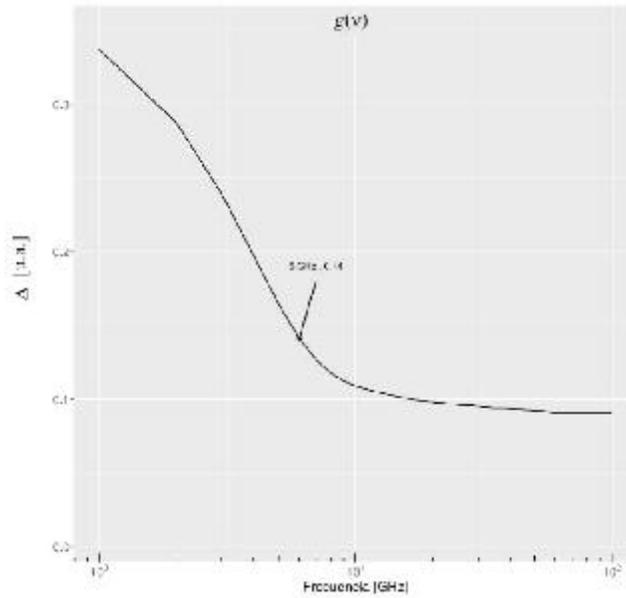


Figura 3. Perfil de la separación entre niveles en función de la frecuencia de modulación de la señal de entrada al sistema de señalización. Este mismo perfil corresponde al de la función $g(v)$.

4. CONCLUSIONES

El uso de modelos globales obtenidos con *splines* de tercer orden permite el modelado de fenómenos físicos, a partir de algunos datos experimentales del mismo. En el caso de estudio de este trabajo se determinó el comportamiento de un dispositivo semiconductor, a partir de un modelo. Por medio de este es viable plantear la hipótesis de que es posible la descripción y predicción del comportamiento de dos fenómenos físicos, las transiciones interbanda y las colisiones intrabanda, en AOS masivos en arquitectura riesgo. Debe resaltarse que para contar con un modelo más robusto es necesario modelar todos los fenómenos físicos involucrados por separado. En el caso planteado no se aprecia la contribución de cada fenómeno involucrado.

Los cálculos realizados requieren equipo de cómputo de capacidad de procesamiento mínima y el software empleado (R) es de fuente libre y está disponible para sistemas operativos Windows y Linux. El tiempo de cómputo es del orden de ms y no se requiere de gran capacidad de almacenamiento.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a PROMEP por el financiamiento otorgado para la realización del presente trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. M. Ortega Mendoza, A. Franco Árcega, A. López-Monro y M. Montes y Gómez: Lecture Notes in Computer Science, 2016, vol. 9822, pp. 110 – 122.
- [2] V. López-Morales, O. López-Ortega, J. Ramos-Fernández y L. Muñoz: Expert Systems with Applications, 2008, vol. 35, pp. 1506 – 1512.
- [3] A. Omary, A. Wedyan, A. Zghoul, A. Banihani e I. Alsmadi: 2012 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS), 2016, pp. 1-4.
- [4] Neesha Jothi, Nur' Aini Abdul Rashid, Wahidah Husain: Procedia Computer Science, 2015, vol. 72, pp. 306-313.

- [5] G. Borgese, C. Pace, P. Pantano y E. Bilotta: *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2013, vol. 24, no. 9, pp. 1390-1399.
- [6] L. R. Williams: *Artificial Life*, 2016, vol. 22, no. 4, pp. 451-482.
- [7] Liu Lei, Liu Zhenzhong, Lin Lin y Pan Bo: *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 2017, vol. 99, pp. 30-35.
- [8] R. Casagrandi y G. Guariso: *Environmental Modelling & Software*, 2009, vol. 24, Issue 7, pp. 865-871.
- [9] Jon Kepa Gerrikagoitia, Iñigo Castander, Fidel Rebón y Aurkene Alzua-Sorzabal: *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2015, vol. 175, pp. 75-83.
- [10] Mehdi Dehghan y Vahid Mohammadi: *Computer Physics Communications*, 2017, vol. 217, pp 23-34.
- [11] Hélène Debrégeas-Sillard y Christophe Kazmierski: *Comptes Rendus Physique*, 2008, vol. 9, issue 9, pp. 1055-1066.
- [12] O. Pérez-Cortés, A. Albores-Mejía y H. Soto-Ortíz: *IEICE Transactions on electronics*, 2011, vol. E94.C N 12, pp. 1872-1880.
- [13] O. Pérez-Cortés, H. Soto Ortíz, Juan C. Domínguez Valdez: *Microwave and Optical Technology Letters*, 2013, vol. 55, issue 6, pp. 1316-1321.