

Comportamiento de Estructuras Fotónicas de Computación aptas en Comunicaciones Ópticas

A. Hurtado Villavieja, A. González Marcos, J. A. Martín Pereda
E.T.S.I de Telecomunicación
Universidad Politécnica de Madrid
c/Ciudad Universitaria s/n
28040-Madrid
Tfno.: 91 5495762 ext.425
Fax: 91 3367319.
E-mail: hurtado@tfo.upm.es

Áreas de interés: Óptica No Lineal
Palabras Clave: Biestabilidad Óptica,
Puerta Lógica, Computación Óptica.

1.- Introducción

Cuando se introduce una no linealidad óptica dentro de una cavidad resonante, se pueden producir efectos de conmutación rápida entre dos estados diferenciados de transmisión. Este fenómeno se conoce por biestabilidad óptica, caracterizado porque la salida de los dispositivos con este tipo de comportamiento constan de dos estados estables diferenciados y una región asociada a un ciclo de histéresis en la cual el sistema es inestable. En dicha región la salida posee valores diferentes para un mismo valor de entrada en función de la historia del dispositivo.

La primera predicción de la biestabilidad óptica fue para el caso de medios de absorción saturable, pero fue demostrada experimentalmente por vez primera en medios caracterizados por la no linealidad del índice de refracción en función de la intensidad óptica[1]. Este descubrimiento tuvo lugar a finales de los años setenta del pasado siglo y desde entonces la biestabilidad óptica ha sido profusamente estudiada por las innumerables nuevas aplicaciones prácticas que con su aparición se abrían. Una aplicación de estos dispositivos consiste en el procesamiento de señales ópticas directamente sin la necesidad de conversión a señal eléctrica mediante la creación de puertas lógicas ópticas. Una puerta lógica es un dispositivo empleado en computadores digitales para la realización de operaciones aritméticas y para evaluar la verdad de una proposición mediante el uso de elementos capaces de realizar funciones lógicas booleanas[2]. Ejemplo de la realización de puertas lógicas ópticas con dispositivos biestables, son por ejemplo puertas NOR[3], o puertas AND[4].

El presente trabajo se centra en la modelización de un dispositivo biestable totalmente óptico para su aplicación como parte integrante de la estructura de una célula lógica ópticamente programable (CLOP), creada por los autores y cuya estructura queda descrita en anteriores trabajos[5-6]. La principal aportación de este trabajo reside en el procesamiento de señales aptas en comunicaciones ópticas. Las aplicaciones de esta célula son variadas, por ejemplo para procesado de señales en computación óptica como base para el desarrollo de circuitos lógicos. De igual modo, también posee aplicaciones en el campo de las comunicaciones ópticas[7]. Particularmente interesantes son las aplicaciones de la célula como generadora de señales caóticas digitales[5], cuyo uso es útil en el campo de la encriptación y de las comunicaciones seguras[8].

2.- Dispositivo óptico biestable como elemento de una puerta lógica óptica.

2.a.- Ecuaciones del modelo

El comienzo del análisis consiste en describir las ecuaciones sobre las que opera el modelo y que describen la densidad de fotones y de portadores promediadas en la cavidad[5]:

$$dS/dt = v_g a \Gamma (N - N_0) [S / (1 + \epsilon S)] - (S / \tau_p) + B \Gamma \beta N^2 \quad (1)$$

$$dN/dt = -v_g a (N - N_0) [S / (1 + \epsilon S)] - (AN + BN^2 + CN^3) + (I/qdL\omega) \quad (2)$$

donde: S es la densidad de fotones dentro de la cavidad, v_g es la velocidad de grupo a lo largo de la cavidad, a es el coeficiente de ganancia lineal del material, Γ es la proporción de fotones que viajan por el interior de la región activa, N es la densidad de portadores en la región activa, N_0 es la densidad de portadores para transparencia, τ_p es el tiempo de vida del fotón, B es el coeficiente de recombinación bimolecular, ϵ es el coeficiente de ganancia no lineal, β es el factor de acoplamiento de emisión espontánea, I es la corriente inyectada, q es la carga del electrón, d es el grosor de la región activa, ω es la anchura de la región activa y L es la longitud de la cavidad.

Al tratarse el dispositivo utilizado de un dispositivo con una estructura de Multi-Quantum Well, esta estructura queda descrita por una nueva ecuación que define la densidad de portadores dentro de la región SCH (Separate Confinement Heterostructure).

$$dN_{SCH}/dt = [I / (q\omega d_{HalfSCH}L)] - (N_{SCH}/\tau_{capture}) + [(N_{MQW}/\tau_{escape})(d_{MQW}/d_{HalfSCH})] \quad (3)$$

donde: d_{MQW} es el grosor total de todos los pozos cuánticos, $d_{HalfSCH}$ es el grosor de uno de los lados de la región SCH, $\tau_{capture}$ es la constante de tiempo de captura de los pozos y τ_{escape} es la constante de tiempo de escape de los pozos.

2.b.- Estructura propuesta

La estructura propuesta aparece en la figura 1. Consta de un dispositivo biestable óptico operado en transmisión y que actúa como conmutador entre estados o discriminador de umbral, que denominaremos dispositivo Q. Sobre este dispositivo inciden tres señales ópticas, dos de ellas I1 e I2 son señales ópticas binarias de datos y la tercera, la señal h, es una señal óptica de control. A la salida del dispositivo Q se obtiene una señal óptica O que corresponderá a una función lógica obtenida a partir de las señales de datos binarias de entrada.

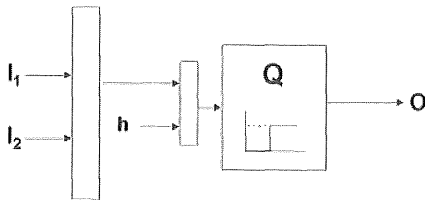


Figura 1: Diagrama de bloques de la estructura propuesta.

Bajo esta configuración la intensidad óptica que incide sobre el dispositivo Q viene expresada por:

$$I_q = (I_1 + I_2) / 2 + h \quad (4)$$

Como ya se ha comentado el dispositivo Q actúa como conmutador entre estados, por lo cual para valores de potencia de entrada inferiores a un determinado valor umbral d_q la salida del dispositivo será baja o cero, y para valores de potencia de entrada al dispositivo superiores al umbral la salida del dispositivo será alta o uno. El nivel umbral del dispositivo Q se selecciona de tal manera que sea igual al valor de potencia del bit 1 de las señales de datos binarios I1 e I2. La señal de control h será la encargada, mediante el nivel de potencia que posea en cada instante, de determinar qué función lógica se genera a partir de las señales de datos de entrada. Esta señal h está configurada de modo que puede poseer únicamente tres niveles de potencia óptica, que denominaremos señal h0, señal h1 y señal h2 respectivamente. Estos niveles de potencia estarán equiespaciados en potencia y serán múltiplos del valor de potencia normalizado del bit 1 de las señales de datos. Estos niveles corresponden respectivamente a:

$$\begin{aligned} h_0 &= 0 \quad \text{x (nivel de potencia del bit 1)} = 0 \\ h_1 &= 0.5 \text{ x (nivel de potencia del bit 1)} \\ h_2 &= 1 \text{ x (nivel de potencia del bit 1)} \end{aligned}$$

Las señales de control se situarán respectivamente dentro del rango de la función de transferencia del dispositivo Q, en el origen de coordenadas (h0), en el nivel umbral y por tanto ya en el estado alto de salida (h2) y en el punto medio de la distancia entre el origen de coordenadas y el nivel umbral y todavía en el estado bajo (h1). En la figura 2 se puede observar gráficamente la función de transferencia del dispositivo Q, a la vez que su modo de actuación para la obtención de una función lógica a su salida, como resultado de la combinación de las señales de datos I1 e I2 y la de control h. En la tabla 1 quedan resumidas de modo conjunto las funciones lógicas que se obtienen a la salida del dispositivo Q a partir de las señales ópticas binarias de datos y en función del valor de la señal de control h.

Señal de control, h	h0	h1	h2
Función lógica, O	AND	OR	ON

Tabla 1. Funciones lógicas de salida en O.

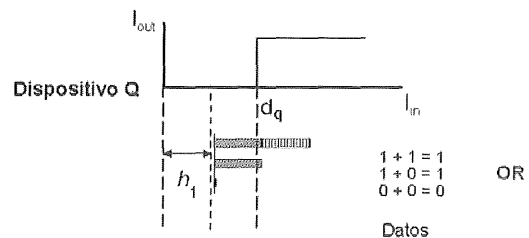


Figura 2: Funcionamiento del dispositivo Q con señal de control h1.

2.c.- Simulación de un dispositivo biestable óptico.

Para la simulación del dispositivo biestable óptico se utiliza la herramienta software VPIComponentMaker Active Photonics™. Para la modelización del dispositivo biestable hacemos uso de un láser de Fabry-Perot con estructura de Multi Quantum Well, cuyos parámetros se incluyen en la Tabla 2. Configuramos el dispositivo sin corriente de polarización y de forma que esté desajustado a transmisión a la frecuencia de emisión de la fuente externa aplicada. De este modo la salida de potencia del dispositivo inicialmente será prácticamente nula. Al aumentar la potencia de entrada al dispositivo, se producirán variaciones en la densidad de portadores. Estas variaciones modificarán el índice de refracción, lo que cambiará las características de transmisión del dispositivo. Hasta un momento en que el sistema se adapta a transmisión, produciéndose la conmutación entre estados, característica fundamental de los dispositivos biestables.

Para modelar los cambios en el índice de refracción en función de la densidad de portadores, la herramienta incluye una serie de parámetros (todos ellos incluidos en la Tabla 2), como son el Índice de Refracción Diferencial SCH dn/dN , el Factor de

Confinamiento SCH y los parámetros Ancho de Línea del Material, α y el Coeficiente de ganancia lineal del Material, a . Todos ellos vienen relacionados por la expresión:

$$dn/dN = -(\alpha\lambda/4\pi) (dg/dN) \quad (5)$$

donde: λ es la longitud de onda, n es el índice de refracción, dg/dN es el diferencial de ganancia y según el modelo es igual al parámetro a , y N es la densidad de portadores que viene expresada en (2 y 3).

Tabla 2. Cuadro resumen de parámetros utilizados.

Parámetros utilizados en el modelo	Valor
Longitud de onda nominal	m 1.55252e-6
Longitud de chip	m 26x10e-6
Anchura de la región activa	m 2.5x10e-6
Grosor de la región activa	m 0.04x10e-6
Factor Confinamiento MQW	0.07
Factor Confinamiento SCH	0.56
Índice Efectivo de Grupo	3.7
Reflectividades de las caras	0.5
Eficiencia de Acoplamiento Óptico	1
Pérdidas internas fijadas	1/m 3000
Ancho de Línea del Material MQW	12*
Índice Refr. Diferencial MQW	m ³ -1.11x10e-6
Índice Refr. Diferencial SCH	m ³ -1.5x10e-6
Coef. Recombinación Lineal	1/s 1e10
Cof. Recombinación Bimolecular	m ³ /s 0
Coef. Recombinación Auger	m ⁶ /s 0
Coef. Ganancia Lineal Material	m ² 25x10e-20*
Dens. Portadores Transparencia	1/m ³ 1.5x10e24
Coef. Ganancia No Lineal	1/m ³ 10e-13
Const. Tiempo Captura Portadores	s 70x10e-12
Const. Tiempo Escape Portadores	s 140x10e-12
Parámetro Inversión Población	2

*Valores elevados pero dentro del margen máximo expresado en su descripción.

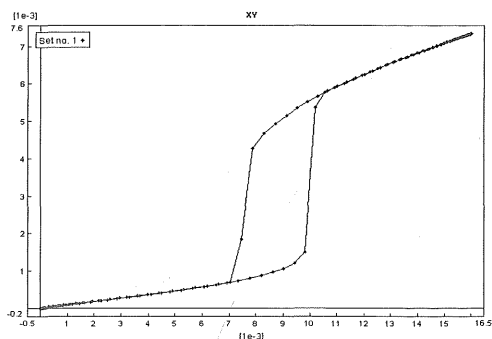


Figura 3. Función de transferencia del dispositivo biestable.

La figura 3 muestra de modo gráfico la función de transferencia obtenida para el dispositivo modelado. La señal aplicada a la entrada del mismo es una señal óptica sinusoidal, resultante de la modulación externa de un láser CW de anchura espectral mínima y de 16mW de potencia, que emite a la frecuencia de 193.1e12Thz (situada esta frecuencia dentro del rango de la tercera ventana de las comunicaciones ópticas) con una señal eléctrica sinusoidal

de 1Mhz de frecuencia. Se aprecia claramente el comportamiento biestable del dispositivo, que presenta únicamente dos estados de salida para todo el rango de valores de potencia de entrada y un ciclo de histéresis asociado.

2.d.-Aplicación del dispositivo simulado como dispositivo Q de la CLOP.

La función de transferencia obtenida de nuestro dispositivo se ajusta perfectamente a la requerida por el dispositivo Q, como se puede comprobar comparando las figuras 2 y 3. La potencia óptica de entrada al dispositivo Q viene expresada en (4) y depende de las señales de datos y de la señal de control h. Esta señal de control presentará tres valores h0, h1 y h2, siendo estos valores múltiplos del valor del bit 1 de entrada y equiespaciados en potencia. Estos requisitos se pueden cumplir con el dispositivo simulado para lo cual seleccionamos los valores: Bit 1 de datos = 12mW; h0 = 0mW; h1 = 6mW; h2 = 12mW.

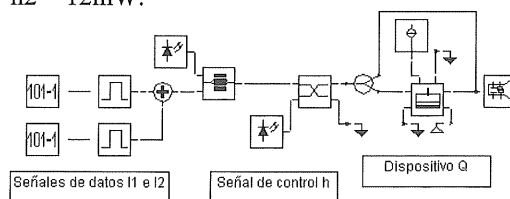


Figura 4. Circuito diseñado formado por las señales de datos, de control y el dispositivo Q.

Para la realización del estudio, se diseña el circuito de la figura 4. Se generan dos señales ópticas de datos binarios, mediante el uso de dos generadores de señales binarias eléctricas que modulan externamente a un láser CW de anchura espectral mínima, que emite a la frecuencia de 193.1x 10¹²Thz. La tasa de bit de las señales de datos es de 625Mbps, aproximadamente igual al estándar STM-4 de comunicaciones ópticas. En la figura 5 se aprecia el resultado de la etapa generadora de señal, que corresponde a la semisuma de las señales de datos ópticas I1 e I2. Posteriormente dicha señal semisuma se combinará en un acoplador pasivo 50:50, con un láser CW de anchura espectral mínima que configurará el nivel de la señal de control h en cada caso. Las señales de datos, conjuntamente con la señal de control, incidirán al dispositivo y será a su salida donde se obtendrá la función lógica en función de las señales de datos.

Comprobamos ahora el funcionamiento correcto del modelo propuesto, mediante la adición a la señal de la figura 5, de los tres valores de la señal de control h (0, 6 y 12mW) en cada caso, para ver si efectivamente la salida proporcionada se corresponde con la función lógica esperada según la descripción del funcionamiento de la estructura propuesta. Las figuras 6(a), 6(b) y 6(c), muestran gráficamente las salidas obtenidas para cada valor particular de la señal de control h. El modo de funcionamiento

del sistema es el siguiente: en el caso de que la señal de control sea igual a h_0 , los valores de potencia de entrada al dispositivo Q son 0mW, cuando ambas señales de datos son iguales a cero, 6mW cuando sólo una de las dos señales de datos es uno y 12mW cuando ambas señales son iguales a uno al mismo tiempo. Únicamente en el tercer caso se supera el umbral de biestabilidad, con lo que sólo para ese caso la salida conmutará a estado alto, obteniéndose así la función lógica AND. Cuando la señal de control aplicada es h_1 igual a 6mW, al dispositivo entran valores de potencia de 6, 12 y 18mW, los dos últimos están ya por encima del umbral del dispositivo, siendo por tanto la función lógica obtenida en este caso, la función lógica OR. Por último, cuando la señal de control es la h_2 igual a 12mW, al dispositivo inciden valores de potencia de 12mW, 18mW y 24mW. Todos ellos se sitúan por encima del umbral de biestabilidad, luego en cualquiera de los casos, la salida del dispositivo siempre estará en estado alto, siendo la función lógica obtenida la ON. Se comprueba que estos resultados, coinciden con los expresados en la tabla 1.

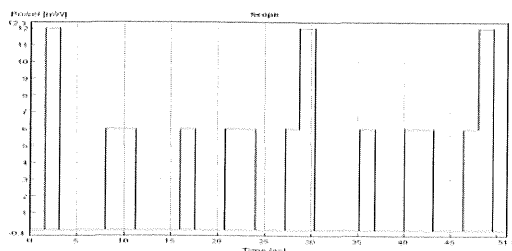


Figura 5. Semisuma de las señales de datos que inciden al dispositivo Q.

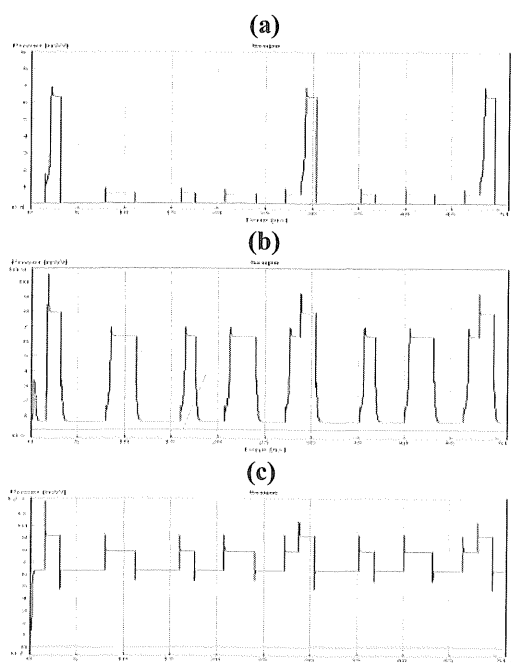


Figura 6: Señales de salida del dispositivo Q para cada caso de valor de señal de control h . (a) $h_0=0mW$, función AND (b) $h_1=6mW$, función OR (c) $h_2=12mW$, función ON.

Cabría hacer una consideración para aclarar los resultados gráficos mostrados en las figuras 6(a), 6(b) y 6(c). La función de transferencia del dispositivo no es perfectamente ideal, de ahí que aunque los dos estados de salida (alto y bajo) están perfectamente diferenciados, éstos no sean perfectamente constantes, por lo que a la salida se aprecia que existen '1s' y '0s' con mayor amplitud que otros, si bien la diferencia entre el '1' y el '0' es suficientemente grande e igual a 10:1.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por C.I.C.yT. y por la Comunidad Autónoma de Madrid-C.A.M. proyectos de investigación TIC99-1131 y 7T/0037/2000 respectivamente.

3.- Bibliografía

- [1] H.M. Gibbs, S.L. McCall, y T.N.C. Venkatesan, "Differential gain and bistability using a sodium-filled Fabry-Perot-interferometer", Phys. Rev. Lett., vol. 36, pp. 1135-1138, 1976.
- [2] M.N. Sriharshavardhan, "Optical Computers, Lighting the way to the fast track", IEEE Potentials, Vol:15 Issue:2, Apr/May 1996.
- [3] A. Migus, A. Antonetti, D. Hulin, A. Mysyrowicz, H.M. Gibbs, N. Peyghambarian, J.L. Jewell, "One-picosecond optical NOR gate at room temperature with a GaAs/AlGaAs multiple-quantum-well-nonlinear Fabry-Perot Etalon", Appl. Phys. Lett, vol.46, pp.70-72, 1985.
- [4] T. Venkatesan, B. Wilkens, Y.H. Lee, M. Warren, G. Olbright, H.M. Gibbs, N. Peyghambarian, J.S. Smith, A. Yariv, "Fabrication of arrays of GaAs optical bistable devices", Appl. Phys. Lett, vol. 48, pp. 145-147, 1986.
- [5] A. González-Marcos, J.A. Martín Pereda "Digital Chaotic Output from an Optically-Processing Element". Optical Engineering, 35, 525-535 (1996).
- [6] A. González-Marcos, J.A. Martín Pereda "Análisis of irregular behaviour on an optical computing logic cell", Optics & Laser Technology, 32, 457-466 (2000).
- [7] J.A. Martín-Pereda, A. Gonzalez-Marcos, "Logic Cells as basic structures to add/drop WDM information signals" SPIE's 47th Annual Meeting. Seattle, WA-USA 7-11 Julio 2002.
- [8] A. Gonzalez-Marcos, J.A. Martín-Pereda "Coder/decoder with an optical programmable logic cell" SPIE's 47th Annual Meeting. Seattle, WA-USA, 7-11 Julio 2002.