

Márgenes de eficiencia de la biestabilidad óptica activa en semiconductores

Semiconductors active optical bistability efficiency margins

J. Solís Ros, A. González Marcos^(*), J. A. Martín Pereda

Departamento de Tecnología Fotónica, E.T.S.I. Telecomunicación, UPM, Ciudad universitaria,
28040, Madrid, Spain.

^(*)Email: agonmar@tfo.upm.es

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Recibido / Received: 16/10/2009. Versión revisada / Revised version: 20/11/2009. Aceptado / Accepted: 23/11/2009

RESUMEN:

La importancia de la biestabilidad óptica activa es un hecho conocido, pero el uso de este efecto no lineal requiere de una correcta caracterización del dispositivo, que nos permita determinar las condiciones de polarización del mismo, para una función dada, entre las diversas aplicaciones que ofrece. El presente trabajo describe la metodología empleada para la caracterización de un diodo láser mediante herramientas CAD comerciales. Se presentan los resultados de los parámetros más característicos, contraste y anchura de histéresis, en las condiciones estándar para poder identificar los márgenes de eficiencia.

Palabras clave: Biestabilidad Óptica, Diodo Láser, Ciclo de Histéresis, Contraste.

ABSTRACT:

The importance of the active optical bistability is a known fact, but the use of this nonlinear effect requires of a correct characterization of the device, that allows determining the polarization conditions for a given function among the diverse applications that offers. Present work describes the methodology used for the characterization of a laser diode, by the use of the commercial tools CAD. The results of the most characteristic parameters, contrast and hysteresis width, in the standard conditions, are showed, in order to be able to identify the efficiency margins.

Key words: Optical Bistability, Diode Laser, Hysteresis Cycle, Contrast.

REFERENCES AND LINKS

- [1] E. Garmire, "Resonant optical nonlinearities in semiconductors", *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **6**, 1094-1110 (2000).
- [2] H. M. Gibbs, *Optical Bistability: Controlling Light with Light*, Academic Press (1985).
- [3] A. M. Kaplan, G. P. Agrawal, D. N. Maywar, "All-optical flip-flop operation of VCSOA", *Electron. Lett.* **45**, 127-128 (2009).
- [4] G. P. Bava, F. Castelli, P. Debernardi, L. A. Lugiato, "Optical bistability in a multiple-quantum-well structure with Fabry-Perot and distributed-feedback resonators", *Phys. Rev. A* **45**, 5180-5191 (1992).
- [5] L. Li, "A unified description of semiconductor lasers with external light injection and its application to optical bistability", *IEEE J. Quantum Elect.* **30**, 1723-1731 (1994).
- [6] A. P. Gonzalez-Marcos, J. A. Martin-Pereda, A. Hurtado, "Bit noise from an optical logic gate with laser diodes", *Proc. SPIE* **5468**, 56-65 (2004).
- [7] J. Solís Ros, *Estudio de la Biestabilidad en Diodos Láser mediante Herramientas CAD*, Proyecto Final de Carrera, E.T.S.I. Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid (2008).
- [8] <http://www.vpiphotonics.com/>

1. Introduction

Observando las líneas actuales de investigación, comprobamos cómo estamos viviendo el auge cada vez mayor de las comunicaciones ópticas. Una de las principales ventajas que los nuevos sistemas ópticos ofrecen es la posibilidad de que las señales no deban ser convertidas a eléctricas para el procesamiento de las mismas, sino que toda transformación o regeneración necesaria pueda hacerse perfectamente en el dominio óptico, multiplicando así la velocidad y ahorrando recursos económicos y de tiempo. El elemento esencial para que este proceso pueda llevarse a cabo es el conmutador óptico, siendo el láser amplificador de semiconductor (SLA, Semiconductor Laser Amplifier) uno de los dispositivos que presenta mejores prestaciones para actuar como tal.

Entre sus características más importantes está la capacidad de presentar lo que comúnmente se denomina biestabilidad óptica, fenómeno fundamentado en las propiedades no lineales del láser y en el uso de un correcto lazo de realimentación.

Apoyados en esta propiedad es posible crear dispositivos de procesamiento óptico, tales como puertas lógicas, esenciales para que sea posible el objetivo anteriormente mencionado de la transmisión “todo-óptico” de información. Por ello, el conocimiento de sus prestaciones y sus márgenes de funcionamiento son imprescindibles para poder identificar su aplicación concreta.

El objetivo de este trabajo es presentar la metodología de estudio y el rango de valores que caracterizan la biestabilidad en el dominio de la potencia, de acuerdo con la variación de los valores de algunos parámetros de fabricación del dispositivo SLA.

En un primer apartado comentaremos brevemente los conceptos relacionados con la biestabilidad óptica y los semiconductores, además de caracterizar la curva de biestabilidad óptica activa que será objeto de estudio. A continuación se describirá la metodología de simulación empleada, y se indicarán los parámetros que más afectan a la respuesta biestable. Por último, y después de exponer los resultados, se extraen las conclusiones de este estudio que nos permitirán evaluar las condiciones óptimas de diseño o de trabajo de los dispositivos SLA.

2. Biestabilidad óptica activa

Los fundamentos teóricos que permiten explicar la existencia de biestabilidad óptica activa en una cavidad resonante están relacionados con las intensidades ópticas introducidas que modifican el índice de refracción del medio, y que infieren un ciclo de histéresis en el parámetro que se analice. Existe una dependencia de las densidades y concentraciones de portadores [1], de forma que la señal óptica disminuye la densidad de portadores por emisión estimulada (saturación de ganancia) y simultáneamente aumenta el índice de refracción.

2.1. Tipos de biestabilidad

En la clasificación de los tipos de biestabilidad podemos atender a diferentes criterios:

2.1.1. Dependiendo de sus condiciones de no linealidad:

- a) Biestabilidad dispersiva: el efecto aparece por la dependencia del índice de refracción con la potencia óptica inyectada.
- b) Biestabilidad por absorción: tiene su origen en la dependencia del coeficiente de absorción con la potencia óptica inyectada.

2.1.2. En función de si presenta ganancia o no:

- a) Biestabilidad activa: aquella que surge en un resonador óptico que contenga un semiconductor o un medio no lineal con bombeo e inversión de población.
- b) Biestabilidad pasiva: cuando el resonador óptico contiene un semiconductor o medio no lineal al que no se aplica bombeo alguno.

2.1.3. Si es intrínseca o híbrida:

- a) Biestabilidad intrínseca: cuando el efecto se produce como consecuencia de una realimentación totalmente óptica.
- b) Biestabilidad híbrida: cuando se utiliza algún tipo de realimentación eléctrica para obtener el comportamiento biestable.

2.1.4. Parámetro externo:

- a) Dominio de la potencia – el ciclo de histéresis aparece con la variación de la potencia óptica de entrada.
- b) Dominio de la frecuencia – el ciclo de histéresis depende de la variación de la frecuencia de la señal incidente.

Puede definirse la biestabilidad óptica activa en el dominio de la potencia, como el comportamiento no lineal de un láser actuando a modo de amplificador, donde para un determinado valor de la potencia de entrada se produce un incremento de la potencia de salida (transmitida o reflejada). Recorriendo el ciclo de valores de potencia de entrada a la inversa, obtenemos unas pautas similares, con la salvedad de que el momento en el que se produce el “salto” no lineal es diferente, formando así lo que se conoce como ciclo de histéresis (Fig. 1).

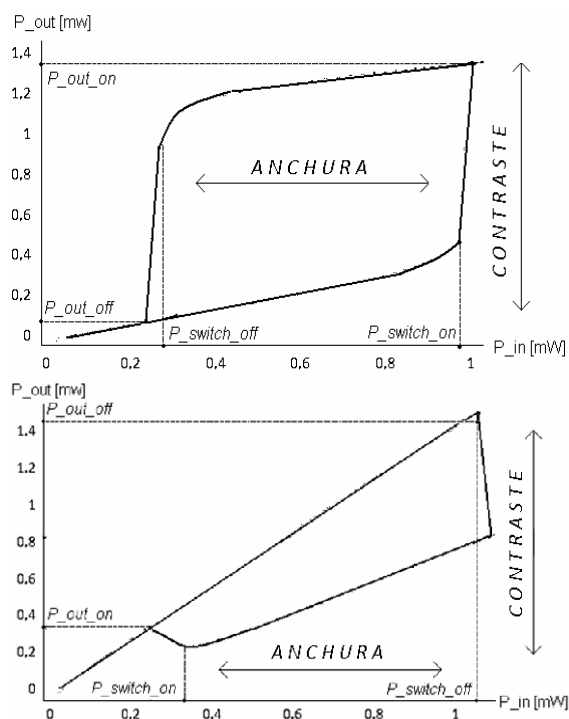


Fig. 1. Ejemplo de un ciclo biestable en transmisión y reflexión respectivamente.

La biestabilidad estudiada se obtiene sobre un dispositivo concreto, en el que hay que fijar la corriente de polarización. Se elige la frecuencia óptica de la señal de entrada con un desfase determinado con respecto a la frecuencia de resonancia del dispositivo en estudio y se determina la potencia óptica incidente sobre el dispositivo de dicha señal.

Por último, y de acuerdo con la curva de la Fig. 1 obtenida, se determina:

- la potencia óptica incidente, tanto en conmutación ON como en conmutación OFF, que nos permitirá determinar la anchura del ciclo de histéresis.

- la potencia óptica de salida (transmitida o reflejada), tanto en el estado ON como en el estado OFF, lo que nos permitirá caracterizar el contraste que presenta el dispositivo.

2.2. Tipos de láseres de semiconductor

Los láseres de semiconductor se diferencian de acuerdo con el medio activo empleado y la técnica de realimentación o tipo de resonador que permitirá su funcionamiento como oscilador.

Independientemente del material, que fijará la banda de funcionamiento, su estructura es una doble heterounión con la región activa confinada en el medio. La región activa, de acuerdo con su espesor, puede ser del tipo: bulk, SQW –*Single Quantum Well*– (espesores menores de 50nm), MQW –*Multi Quantum Well*–, varias capas de pozos cuánticos-, en hilo cuántico y punto cuántico –*QD*-. Según las diferentes estructuras se consigue reducir: el ancho espectral, la variación de longitud de onda de emisión con la corriente inyectada y, sobre todo, se disminuye el chirp o variación de la distribución espectral emitida con la modulación de la fuente. Aunque un láser SQW presenta una intensidad umbral alta y potencia de emisión baja, el problema de la potencia emitida se soluciona usando múltiples pozos cuánticos (MQW), reduciéndose la intensidad umbral a base de proporcionar unas ciertas tensiones entre capas: pozos cuánticos tensionados (SMQW).

En cuanto a las técnicas de realimentación, la de Fabry-Perot constituye la base estándar de funcionamiento, incluso en láseres monomodo como son los VCSEL –*Vertical Cavity Surface Emission Laser*–, que con estructuras de resonador vertical respecto de la zona activa consiguen cavidades muy pequeñas y, por tanto, un solo modo del resonador entra en el ancho espectral de ganancia del medio activo. Aunque existen muchas configuraciones para reducir el número de modos longitudinales de emisión, la más empleada es la basada en estructuras DFB –*Distributed FeedBack*–.

En estos tipos de láseres se ha demostrado la biestabilidad óptica activa en el dominio de la potencia, teórica y experimental [3,4].

3. Metodología de simulación

En un primer estudio, con objeto de optimizar la metodología empleada, se ha optado por la estructura más sencilla: un diodo láser de Fabry-Perot, tipo bulk. Con objeto de usar técnicas de ingeniería de diseño de fiabilidad conocida, se emplea una herramienta aplicada a las redes de comunicaciones ópticas, con diodos láser de materiales que emiten en tercera ventana y con las características por defecto o de partida indicadas en la Tabla I. Una comparativa entre diferentes tipos de estructuras de diodos láser y su comportamiento biestable con la herramienta de simulación empleada en este trabajo puede verse en [5].

Básicamente, para el estudio de la biestabilidad, el procedimiento a seguir consistirá en, para unos determinados valores de los parámetros que serán posteriormente comentados, obtener la corriente umbral de la cavidad láser con el montaje de la Fig. 2, a continuación se simulará la curva que relaciona las potencias de entrada y salida en el láser, a través de los montajes de las Figs. 3 y 4. A partir de ahí, se irá variando la corriente de polarización del láser, registrando cómo varía el ciclo de biestabilidad obtenido. Una vez que dicha variación quede suficientemente caracterizada, se procederá a variar algún parámetro de los anteriores, repitiendo nuevamente el proceso.

Para la realización se utilizará la herramienta de simulación de entornos fotónicos VPItransmission-Maker (Versión 7.6).

El tipo de estructura láser empleada, tal y como se indica en la Tabla I, corresponde a uno de tipo bulk. El comportamiento biestable con otros tipos de estructura, ya ha sido demostrado y analizado bajo el punto de vista de puertas lógicas [6].

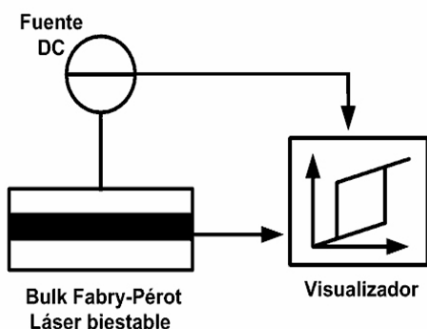


Fig. 2 Montaje en VPI para la obtención de la corriente umbral de la cavidad láser.

Tabla I

Parámetros por defecto del simulador

Parámetro	Valor por defecto
Tipo de región activa	Bulk
Longitud de la sección del dispositivo	400×10^{-6} (m)
Anchura de la región activa	$2,5 \times 10^{-6}$ (m)
Grosor de la región activa	200×10^{-9} (m)
Eficiencia de inyección de corriente	1
Longitud de onda nominal	$1,552524 \times 10^{-6}$ (m)
Índice efectivo de grupo	3,7
Pérdidas internas	5000 (1/m)
Factor de confinamiento	0,5
Eficiencia de acoplamiento óptico	1
Reflectividad de las caras	$0,3 \times 0,3$
Fase de la reflectividad de las caras	0 (deg)
Recombinación lineal	1×10^8 (1/s)
Recombinación molecular	2×10^{-16} (m ³ /s)
Recombinación por efecto avalancha	$8,25 \times 10^{-41}$ (m ⁶ /s)
Densidad inicial de portadores	$1,0 \times 10^{24}$ (1/m ³)
Coefficiente de ganancia lineal	$2,2 \times 10^{-20}$ (m ²)
Transparencia de densidad de portadores	10^{24} (1/m ³)
Coefficiente de ganancia no lineal	10^{-23} (m ³)
Factor de anchura de línea	6,9
Índice de reflexión en la densidad de portadores	2×10^{-24} (1/m ³)

3.1. Esquemas empleados

Al no existir discontinuidad de funcionamiento en el umbral de un láser de semiconductor, la biestabilidad óptica no debe presentar discontinuidad cuando se polariza en el umbral. En nuestro estudio sólo analizaremos la presencia de biestabilidad por debajo de umbral, de forma que justo por debajo de umbral actúe como un amplificador de tipo resonador [5]. Aunque la corriente umbral varía con la inyección de potencia óptica, en nuestro estudio la medimos sin inyección de señal óptica externa, con $P_{in}=0$, como punto de partida para obtener la biestabilidad en el dominio de la potencia. La señal del láser externo a emplear para la obtención de la biestabilidad es de 193,1 THz con una potencia óptica P_{opt} de 1 mW.

3.1.1. Cálculo de la corriente umbral

De acuerdo a la teoría básica del láser de semiconductor, sabemos que la corriente umbral depende de diversos parámetros, tales como las densidades de portadores, la temperatura, el grado de confinamiento de la señal en la cavidad del láser, las dimensiones de las mismas, etc... En definitiva,

se podría decir que si dichos parámetros modifican el comportamiento biestable, es precisamente debido a que previamente han variado la posición y rango de la corriente umbral I_{th} , de forma que el codo se sitúa ahora en otro punto y tiene distintas propiedades.

El proceso a llevar a cabo se revela como bastante simple: se introducirá la modificación de un parámetro en el esquema o montaje que permite el cálculo aproximado de la I_{th} , se comprueba el nuevo valor obtenido, y a partir de él se produce la modificación de los valores de la corriente de polarización en el segundo de los esquemas. El montaje utilizado en VPI se muestra en la Fig. 2.

3.1.2. Cálculo de la biestabilidad en transmisión

Una vez calculada la corriente umbral, procedemos a la obtención del ciclo biestable en la cavidad láser, relacionando la potencia de entrada con la de salida, y recorriendo un rango de valores mediante una señal senoidal obtenida a través de un modulador AM, y cuya amplitud estará regulada por la presencia de un láser sintonizable. El esquema es el mostrado en la Fig. 3.

3.1.3. Cálculo de la biestabilidad en reflexión

Análogamente al caso de transmisión, pero fijando la señal medida en la salida en reflexión de la cavidad láser, se analiza la señal reflejada que también presenta biestabilidad. El esquema es el mostrado en la Fig. 4.

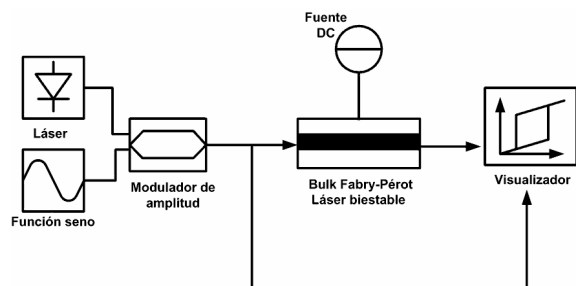


Fig. 3. Montaje en VPI para la obtención del ciclo biestable en transmisión.

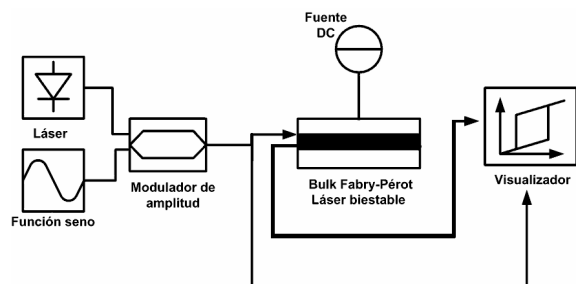


Fig. 4. Montaje en VPI para la obtención del ciclo biestable en reflexión.

3.2. Parámetros de estudio

El estudio detallado, en donde se han modificado los siguientes parámetros, es el resultado del trabajo referenciado en [7]:

- Longitud de la cavidad.
- Anchura y grosor de la cavidad.
- Reflectividad de las caras.
- Pérdidas internas.
- Factor de confinamiento.
- Eficiencia de corriente.

4. Resultados obtenidos

La aplicación de la biestabilidad pasa por disponer de ella para bajas potencia de la señal de entrada; aunque esto siempre pueda ser solventado con un amplificador óptico previo al dispositivo biestable.

El poder discriminar claramente el estado ON y el OFF en la potencia óptica de salida, lo que implica un amplio *contraste*, el cual viene dado por la diferencia entre la potencia P_{out_On} mínima y la potencia P_{out_Off} máxima.

La *anchura* de la histéresis es otro factor fundamental, y de acuerdo con la aplicación interesarán ciclos de histéresis más o menos anchos. Se calcula como la diferencia entre la potencia de entrada para que se produzca conmutación al estado ON, $Switch_On$, y la requerida para que conmute al estado OFF, $Switch_Off$.

Esencialmente comprobamos cómo los valores de potencia para los que se producen los “saltos” van disminuyendo a la par que la corriente de polarización de la cavidad, de manera que la anchura del ciclo se va estrechando paulatinamente, al igual que el contraste. En las Figs. 5 y 6 vemos un ejemplo de este comportamiento para los parámetros por defecto.

En los siguientes casos (es decir, para otros valores de los parámetros de la cavidad) las tendencias son similares, aunque con diferentes valores numéricos. Dado la gran cantidad de gráficas que habría que presentar para ilustrar el trabajo completo, es mejor ver un ejemplo de los valores de corriente en los que más comúnmente se presenta biestabilidad, así como las anchuras más comunes. Este resumen es lo que podemos observar en las Figs. 7 y 8.

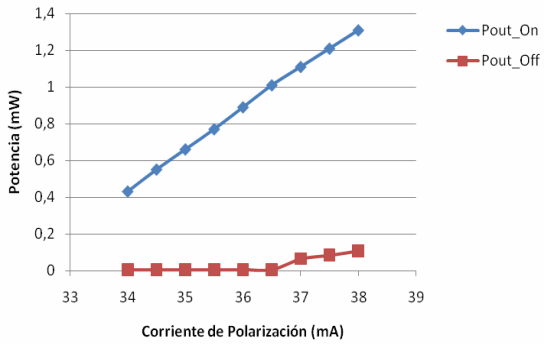
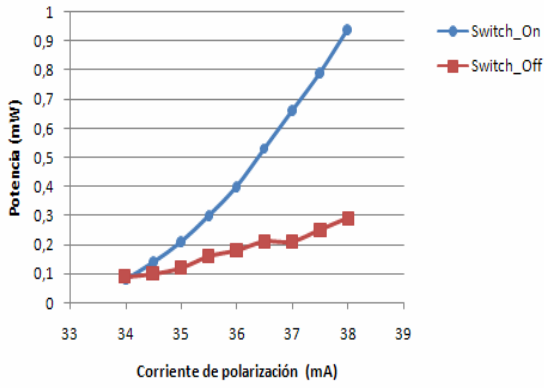
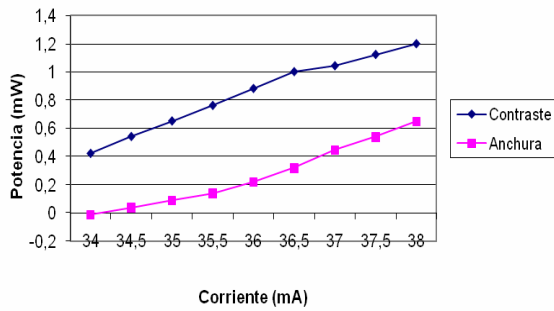
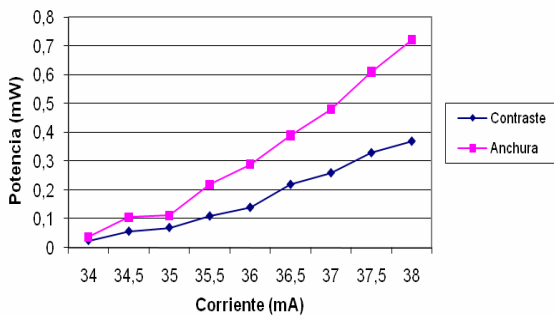


Fig. 5. Tendencia de los valores de *Switch_On*, *Switch_off*, *Pout_On* y *Pout_Off* para los parámetros por defecto (en transmisión).

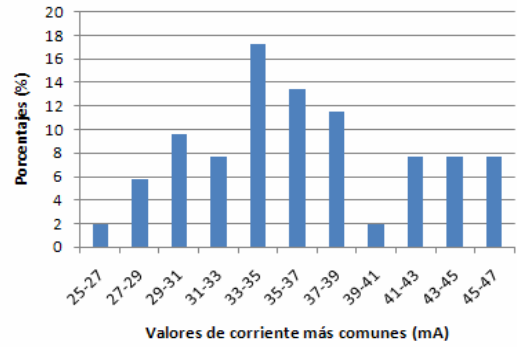


(a)

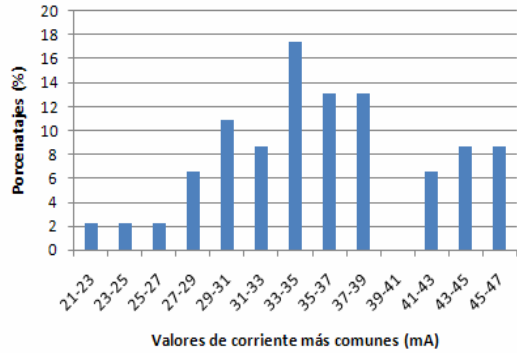


(b)

Fig. 6. Tendencia de la Anchura del ciclo de histéresis y el Contraste para los parámetros por defecto en (a) transmisión y (b) reflexión respectivamente.

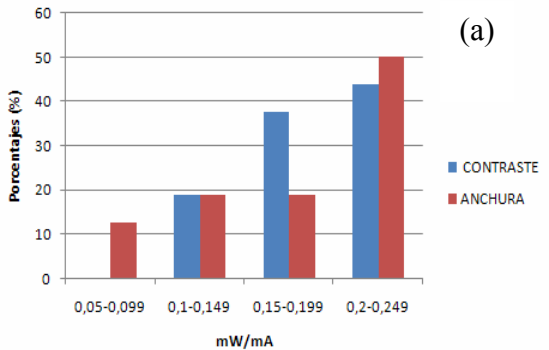


(a)

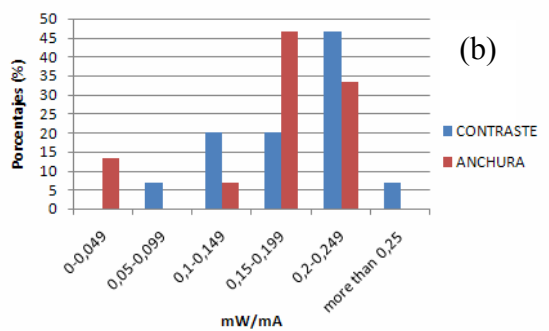


(b)

Fig. 7. Valores de corriente más comunes en los que aparece biestabilidad para (a) transmisión y (b) reflexión respectivamente.



(a)



(b)

Fig. 8. Velocidad de cambio del contraste y la anchura para (a) transmisión y (b) reflexión respectivamente.

5. Conclusión

Gracias a los resultados obtenidos en las simulaciones, podemos saber con exactitud para qué valor de la potencia de entrada se va a producir el fenómeno biestable, cuál va a ser el correspondiente en la potencia de salida de la cavidad láser y cómo va a evolucionar en función de las variaciones de la corriente de polarización.

Todo ello, además, para un amplio rango de disposiciones de parámetros del láser. De esta forma, queda registrado cuál va a ser el comportamiento en el dominio de la potencia para los casos estudiados, convirtiéndose en un conjunto de datos y valores a los que acudir de una forma más precisa y sencilla cuando se necesiten en otras investigaciones relacionadas con el uso de la biestabilidad.