MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN DE DISPOSITIVOS OPTOELECTRÓNICOS UTILIZANDO EL PROGRAMA SPICE

M. Lomer, Francisco J. Ruiz García, J Echevarría, J. L. Arce, M. Morante, J. M. López-Higuera.
ETSI Telecomunicación. Universidad de Cantabria.
Departamento de Tecnología Electrónica - Grupo de Ingeniería Fotónica
Avda. de Los Castros s/n., 39005 Santander. Tel. 942-201495. Fax. 942-201873

Abstract - A detailed description of various equivalent buried-heteroestructure laser circuit models is presented. It is made particular attention to the influence of all the possible parasite elements that they can appear in the model due to the various roads of current in the high frequency behavior of the device, as well as to the parasite elements that appear in the packaged laser. Also they are provided the simulation results through the program SPICE of such equivalent circuits proving a good approximation with the real results for this type of semiconductor lasers.

1. Introducción

La evolución de la tecnología de los láseres semiconductores ha permitido el desarrollo de numerosas y diferentes estructuras adaptadas a diferentes aplicaciones. El diodo láser está ligado estrechamente al desarrollo de las telecomunicaciones ópticas; desde el primer prototipo hasta la actualidad estos han mejorado de manera importante. Una de las preocupaciones, en la optimización de su funcionamiento, es la reducción de la corriente umbral de funcionamiento, ésta está ligado a la estructura geométrica, a los parámetros físicos y a los procesos tecnológicos. De otro lado, el potencial intrínseco del dispositivo, es perturbado por la presencia de elementos parásitos y capacitivos en la estructura. Varios autores han desarrollado modelos equivalentes que tratan de representar el funcionamiento real [1] - [3].

En este trabajo se presenta un modelo eléctrico de la estructura del diodo láser, a partir de su cavidad elemental y se estudia su respuesta en frecuencia. A continuación se estudian las influencias de las diferentes capas que intervienen en la fabricación del dispositivo. En la simulación eléctrica se ha utilizado el programa SPICE.

2. Modelización del diodo láser

2.1. Modelo de la cavidad Fabry - Perot

Una de las condiciones del funcionamiento láser, es la de disponer de una cavidad resonante; en el caso del diodo láser, ésta está constituida por la cavidad Fabry-Perot, obtenida a partir de cortar, en la dirección cristalina conveniente, las dos caras de un film semiconductor que hace de capa activa. La cavidad, así obtenida, tiene la forma de un paralelepípedo. El efecto de la emisión estimulada, puede ser estudiada a partir de las ecuaciones de estado, que traducen las variaciones transitorias de la población de electrones N y de fotones S en la cavidad, dada por las ecuaciones [1]:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N_0}{\tau_n} - \gamma\,(N_0 - N_t)\,S_0\,(1-\varepsilon S_0) \qquad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{S_0}{\tau_p} + \frac{\Gamma\beta N_0}{\tau_n} + \Gamma\,\gamma\,(N_0 - N_t)\,S_0\,(1-\varepsilon S_0) \qquad (2)$$

Donde N es la densidad de portadores, S la densidad de fotones, I la corriente inyectada, V el volumen de la región activa (definido por L: longitud, W: ancho y d: espesor), τ_n la duración de vida espontánea de los electrones, τ_p la duración de vida de los fotones, Γ el factor de confinamiento óptico, ε la fracción de emisión espontánea radiativa acoplada en el modo óptico, γ la ganancia óptica, β es el factor de emisión, N_0 la densidad de portadores en la transparencia y q la carga del electrón. En estas ecuaciones se ha considerado el funcionamiento de un láser monomodo transversal y longitudinalmente, y con una densidad de portadores espacialmente homogénea. Los valores dependen del tipo de material y de la concentración de portadores, para efectos de nuestro análisis, se ha considerado los valores dados por las referencias [1] y [2].

Si se considera una modulación sinusoidal, en pequeña señal alrededor de un punto de funcionamiento I_p, de la forma $I = I_p + i_s \operatorname{sen}\omega t$, las ecuaciones (1) y (2) pueden ser linealizadas y conducen a una solución de la forma : $S(j\omega)/S(0)$, siendo I la corriente total que circula por el diodo láser. Esta solución es similar a la de un circuito resonante de frecuencia ωt. De esta forma es posible describir la respuesta dinámica de la región activa de un diodo láser con la ayuda de un circuito eléctrico RLC. El modelo de la región activa representado a base un circuito RLC, de una cavidad Fabry-Perot, es mostrado en la figura 1. R_j y C_d corresponden a la resistencia y a la capacidad de difusión en la heterounión del láser. L_x representa la

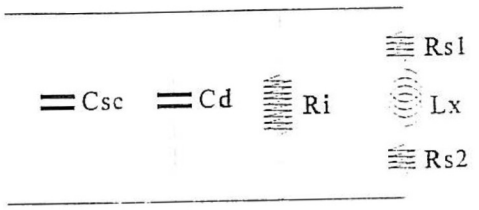

Fig 1- Circuito RLC equivalente de la región activa de tipo Fabry - Perot

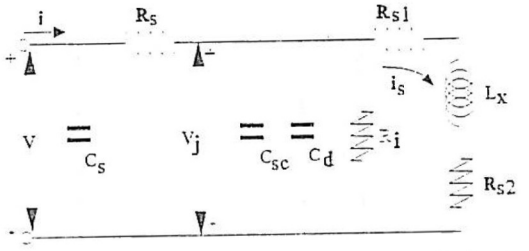

Fig. 2.- Modelo en pequeña señal de la cavidad y de las capas de confinamiento del diodo láser.

acumulación de fotones y R_{s1} y R_{s2} representan el amortiguamiento de la resonancia, debido respectivamente a la emisión espontánea y a la saturación de ganancia. Los elementos del circuito se escriben en función de los parámetros físicos de láser. A partir de la corriente umbral I_{th}, se establecen el punto de funcionamiento I_p.

2.2. Modelo de la influencia de las capas de confinamiento, las corrientes de fuga y parásito.

El modelo de la figura 1, es el modelo de un funcionamiento ideal. En efecto, en la mayor parte de los diodos láseres, la respuesta a la modulación en pequeña señal no corresponde al circuito RLC únicamente sino que se encuentra perturbada por la influencia de otros elementos de la estructura. A partir de un determinado tipo de diodo láser, se puede establecer un modelo equivalente, donde el conjunto de elementos, se ubican en cascada con la zona activa. Dispuesto de esta manera, se puede realizar un estudio completo de la respuesta del diodo láser.

Una de las estructuras láser, más desarrolladas en comunicaciones ópticas, es la cavidad láser enterrada con guiado por el índice (figura 3). Está formada de una cavidad activa central y rodeada de capas laterales que hacen posible el confinamiento de la corriente I. Los materiales dela cavidad y de las uniones dependen de la longitud de onda de trabajo. El equivalente eléctrico, que muestra la influencia de las capas laterales de esta estructura, se presenta en la figura 2. R_s es la resistencia de acceso desde el contacto ólmico hasta la capa activa. C_s es la capacidad del substrato.

Por lo general, la corriente I se compone de casi la mitad, de una corriente de fuga. Esta es debido a diferentes factores, que pueden ser las inperfecciones de las interfaces entre las uniones semiconductoras, que hace que parte de la corriente siga diferentes caminos.

En el caso de la estructura enterrada, mostrada en figura 3, se muestra los posibles caminos de la corriente de fuga, representados I_2 y I_3. La corriente I_1, es la corriente de funcionamiento láser.

El circuito equivalente, que representa las fugas en el diodo láser es mostrado en la figura 4. Está compuesto de resistencias, capacitancias y conductancias. Los valores de C_o, C_2, C_2, R_1, R_2, R_3 y G_2, son determinados a partir de las características geométricas y eléctricas de las capas de la estructura.
En el modelo de la figura 4, se ha agregado la influencia de elementos parásitos aportados por el encapsulado y modelados por L_p, R_p y C_p.

Teniendo en cuenta el modelo de la figura 4, es posible estudiar la estructura desde el punto de vista de la respuesta en frecuencia. De esta manera se pueden detectar los defectos, corregirlos y optimizarlos o encontrar un compromiso entre los diferentes parámetros del diodo láser.

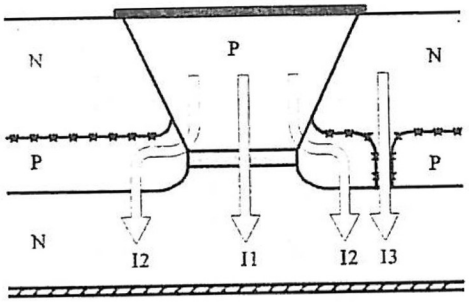

Fig. 3.- Estructura del diodo láser enterrado y el sentido de las diferentes corrientes fugas.

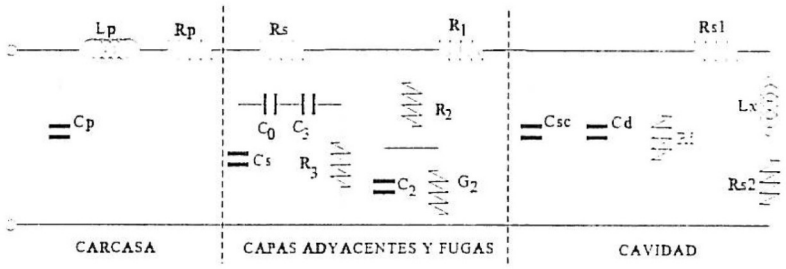

Fig. 4.- Modelo completo del diodo láser

3. Simulación mediante Spice

A partir de los modelos establecidos en el apartado 2. se ha procedido a la simulación. para esto se ha tenido en cuenta una estructura de base y se han considerado las siguientes dimensiones de la cavidad activa: L=250µm. W=2µm y d=0.12µm. Según estos valores. se obtiene la tabla I. Se han considerado dos tipos de materiales. tales como el GaAs y InGaAsP; sin embargo. este modelo es válido para cualquier otro compuesto utilizado en la fabricación del diodo láser. Un programa de subrutina se encarga de realizar los cálculos y obtener los parámetros físicos. que luego se añaden a los componentes del modelo equivalente.

El programa de simulación SPICE es bastante conocido y utilizado en numerosas aplicaciones de modelado. En este trabajo se ha simulado el circuito equivalente en un rango de frecuencias del orden de varios GHz. y así obtener la curva de respuesta del dispositivo.

El comportamiento dinámico del diodo láser se rige por dos ecuaciones diferenciales. la función de transferencia de F(jω) se identifica a la de un filtro de segundo orden: la respuesta del diodo láser. normalizada a la respuesta en frecuencia nula se escribe:

$$\frac{F(j\omega)}{F(0)} = \frac{\omega_0^2}{(j\omega)^2 + 2\zeta\omega_0 (j\omega) + \omega_0^2} \qquad (3)$$

donde $\omega_o=2\pi f_o$. f_o es la frecuencia del filtro equivalente y ξ es el factor de amortiguamiento. La relación (3) permite visualizar los elementos que se pueden ajustar y optimizar su funcionamiento. A continuación se presenta la simulación realizada. primero con la estructura elemental de la cavidad activa y luego con la influencia de las capas de confinamiento. corrientes de fuga y los elementos parásitos introducidos por el encapsulado.

Parámetro	InGaAsP	GaAs
R_1	0'98 Ω	1'5 Ω
C_d	297 pF	299'5 pF
C_{sc}	10 pF	10 pF
R_{s1}	5'5 mΩ	57 mΩ
R_{s2}	286 µΩ	24 µΩ
L	4'8 pH	4 pH

Tabla I.- Componentes del circuito equivalente

En la figura 5 se muestra la respuesta en frecuencia de la cavidad activa a base de GaAs para varias longitudes de L. En este caso se ha utilizado una corriente de polarización de 10 mA. Si bien. se observa una influencia mediante la variación de L. los demás parámetros también pueden ser variados. Esta curva muestra bien el funcionamiento del láser y se verifica que a cortas longitudes de la cavidad aumenta el ancho de banda.

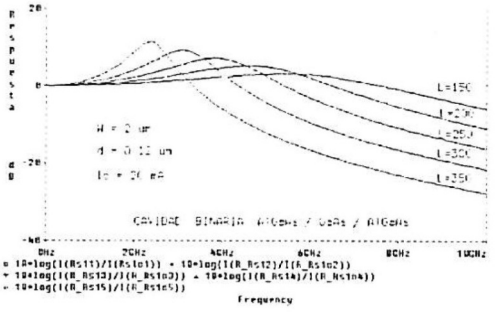

Fig. 5.-Comportamiento de la cavidad láser para varios valores de L.

Físicamente, L es sensible a la corriente umbral del diodo, ésta a su vez esta ligado a ala duración de vida de los fotones. Para una L=250μm, la frecuencia de corte, a -3 dB, se encuentra alrededor de 5,5 GHz.

En la figura 6, se muestra la función de transferencia considerando la influencia de las capas de confinamiento, los caminos de corriente de fuga y del encapsulado del diodo. El material de la capa activa es el InGaAsP. Los valores de los elementos parásitos son: L_p=1,42nH, C_p=0,29pF y R_p=2Ω, de acuerdo a la referencia [4]. Se ha considerado C_s=14,1pF, R_s=4,72Ω, valores correspondientes a un láser de estructura enterrada. Para la misma estructura, se han calculado los valores de los elementos del camino de corriente de fuga: R_1=0,5Ω, R_2=10Ω, C_2=100pF, G_2=0,1Ω^{-1}, C_u=20pF, C_3=25pF y R_3=1kΩ.

La influencia de las capas de confinamiento es evidente (figura 6b), la amplitud de la función de transferencia decae en 7 dB para el pico de resonancia; respecto a la respuesta de la cavidad (figura 6a), también disminuye la banda pasante. Al agregar la influencia de los elementos parásitos del encapsulado (figura 6c), es similar al de la figura 6b. Considerando las corrientes de fuga (figura 6d), se observa bien esta influencia.

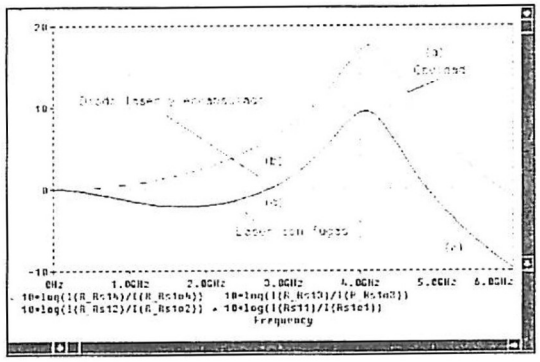

Fig. 6 . Respuesta de simulación del diodo láser en InGaAsP (λ=1,3μm) . a) solo la cavidad activa, b) con las capas de confinamiento, c) con el encapsulado, y d) considerando el modelo equivalente de las fugas

4. Conclusión

Se ha desarrollado el modelado del circuito equivalente de una estructura de diodo láser, método que se ha aplicado a estructuras a base de materiales GaAs y InGaAsP . Así mismo, el modelo puede aplicarse a capas activas de diferentes aleaciones de la columna III-V de la Tabla periódica. Mediante el programa SPICE, se ha simulado los distintos circuitos. Los resultados obtenidos, concuerdan bien con las previsiones teóricas que describen el funcionamiento físico del diodo láser.
Se ha realizado un equivalente eléctrico de los posibles caminos de las corrientes de fuga, mostrándose su influencia en la banda pasante.
A partir de este modelo es posible optimizar su funcionamiento, ya sea eligiendo el dopado del material, que permite variar la resistencia de las capas o modificando la estructura geométrica.

REFERENCIAS

[1] R. S. Tucker and D. J. Pope, "Circuit Modeling of the Effect of Diffusion on Damping in a Narrow-Stripe Semiconductor Laser", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-19, pp.1179-1183, Jul 1983.
[2] C.B. Su, V. Lanzisera, R. Olshansky, W. Powazinik, E. Meland, J. Schlafer, R.B. Lauer, Electron. Lett. Vol. 21, pp. 577, 1985.
[3] M.F. Lu, J.S. Deng, C. Juang, M.J. Jou and B.J. Lee, "Equivalent Circuit Model of Quantum-Well Laser", IEEE J. Quantum Electronics, Vol. 31, pp.1927-1934, Nov. 1995.
[4] M. Maeda, K. Nagano and K. Chiva, "Buried-Heterostructure Laser Packaging for Wideband Optical Transmission Systems", IEEE Transaction on Communications, Vol. COM-26, nº 7, July 1978.

Este trabajo ha sido soportado por la CICYT, gracias al proyecto TIC95-631-C04-01, a la que los autores muestran su agradecimiento.