

Modelo eléctrico simplificado de láseres de cavidad vertical y emisión superficial con oxidación lateral

Simplified electrical model for oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers

S. Menargues Canales ^(1,*), J. Arias ⁽¹⁾, V. Martín Hériz ⁽²⁾, L. Borrueal ⁽²⁾, e I. Esquivias ⁽²⁾

1. Dpto. de Ciencia y Tecnología de los Materiales, Universidad Miguel Hernández, 03202-Elche,

2. Dpto. Tecnología Fotónica, Universidad Politécnica de Madrid, 28040-Madrid.

* E-mail de contacto: silvia.menargues@alu.umh.es.

RESUMEN:

Se presenta un modelo eléctrico de simulación 2D simplificado para láseres de cavidad vertical y emisión superficial (VCSELs) con oxidación lateral funcionando en régimen estático. El modelo resuelve el potencial electrostático en las regiones tipo *p* en las direcciones radial y vertical, y la distribución de portadores en el pozo cuántico en la dirección radial. Se ha simulado una estructura VCSEL de prueba bajo diferentes condiciones y los resultados muestran un buen comportamiento a nivel cualitativo en términos de perfiles laterales de densidad de portadores y de corriente en el pozo cuántico.

Palabras clave: Autodistribución de Corriente, Láseres de Cavidad Vertical y Emisión Superficial, Modelado Eléctrico.

ABSTRACT:

A simplified electrical model for 2D simulation of oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) in the stationary regime is presented. For a given bias current and a fixed number of photons, the model solves the electrostatic potential across the p-doped regions in the radial and vertical directions, and the quantum well (QW) carrier density distribution along the radial direction. A benchmark VCSEL structure was simulated under different conditions and results showed good qualitative behavior in terms of carrier and current density lateral profiles in the QW.

Keywords: Self-Current Distribution, Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, Electrical Modeling.

REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] C. Wilmsen, H. Temkin, L. A. Coldren, Edts., *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers*, Cambridge University Press (1999).
- [2] O. Conradi, S. Helfert, R. Pregla, "Comprehensive modeling of vertical-cavity laser diodes by the method of lines", *IEEE J. Quantum Elect.* **37**, 928-935 (2001).
- [3] J. S. Gustavsson, J. A. Vukusic, J. Bengtsson, A. Larsson, "A comprehensive model for the modal dynamics of vertical-cavity surface-emitting lasers", *IEEE J. Quantum Electron.* **38**, 203-212, (2002).
- [4] A. Valle, "Selection and modulation of high-order transverse modes in vertical-cavity surface-emitting lasers", *IEEE J. Quantum Elect.* **34**, 1924-1932 (1998).
- [5] P. Bienstman, R. Baets, J. Vukusic, A. Larsson, M. J. Noble, M. Brunner, K. Gulden, P. Debernardi, L. Fratta, G. P. Bava, H. Wenzel, B. Klein, O. Conradi, R. Regla, S. A. Riyopoulos, J.-F. P. Seurin, S. L. Chuang, "Comparison of optical VCSEL models on the simulation of oxide-confined devices", *IEEE J. Quantum Elect.* **37**, 1618-1631 (2001).

- [6] M. Osinski, V. A. Smagley, M. Lu, G. A. Smolyakov, P. G. Eliseev, B. P. Riely, P. H. Shen, G. J. Simonis, "Self-Consistent Calculation of Current Self-Distribution Effect in GaAs-AlGaAs Oxide-Confining VCSELs", *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **9**, 1422-1430 (2003).

1. Introducción

El láser de cavidad vertical y emisión superficial (VCSEL) ha emergido como uno de los dispositivos más prometedores en comunicaciones ópticas. La geometría transversal de los VCSELs facilita un buen acoplo a fibra óptica, permite el test de los dispositivos directamente sobre la oblea y una alta capacidad de integración en "arrays" en una y dos dimensiones. Actualmente, la principal aplicación de los VCSELs son los sistemas de comunicaciones de datos en redes de área local operando a corta longitud de onda, habiendo alcanzado velocidades de 10 Gb/s, pero el creciente rango de longitudes de onda y las ventajas ya mencionadas hacen prever a medio plazo su generalización a otras aplicaciones: comunicaciones ópticas, computación óptica, interconexiones, memorias ópticas (CD, DVD), equipamientos optoelectrónicos (impresión, punteros), procesamiento de información óptica, sensores ópticos, procesamiento de imágenes e iluminación [1].

La complejidad y la interacción de los procesos eléctricos, térmicos y ópticos en los VCSELs obligan a emplear técnicas avanzadas de simulación numérica por ordenador si se pretende un nivel de predicción cuantitativo. Los modelos más simplificados cumplen un excelente papel determinando tendencias cualitativas de más fácil comprensión. La dificultad en el proceso es determinar qué simplificaciones son válidas en función del fenómeno que desea analizarse. Aunque existen trabajos numéricos utilizando un tratamiento detallado del transporte de portadores y del flujo de calor [2-3], es de destacar la ausencia de modelos eléctricos y térmicos simplificados que puedan extenderse a modelos dinámicos de VCSELs. Estos modelos son necesarios para describir teóricamente cantidades como las respuestas a la modulación de corriente en pequeña y gran señal. Un denominador común entre los diversos modelos dinámicos [3-4] es la consideración de las dependencias espaciales de los portadores en la región de pozo cuántico (QW) y del campo eléctrico en el interior del láser debido a la excitación de múltiples modos laterales.

2. Modelo teórico

El modelo teórico que se presenta para describir el comportamiento eléctrico del VCSEL con oxidación lateral en régimen estático se basa en una serie de aproximaciones. Asumiendo simetría axial, la primera simplificación consiste en reducir la

estructura tridimensional a una de dos dimensiones (2D), en las direcciones radial (r) y vertical (z), como muestra la Fig. 1. En esta representación 2D la simetría es especular, de modo que es suficiente simular la mitad de la estructura. Esta aproximación es adecuada para las estructuras con oxidación lateral en las que la ventana es lo suficientemente pequeña para que sólo se propague el modo transversal fundamental LP_{01} .

El transporte de portadores en los espejos distribuidos de Bragg (DBRs) y zonas de confinamiento se supone que satisface la ecuación de Laplace para el potencial electrostático local, ϕ .

$$\nabla \cdot (\bar{\sigma} \nabla \phi) = 0, \quad (1)$$

donde $\bar{\sigma}$ es el tensor de conductividad eléctrica dado por,

$$\bar{\sigma} \equiv \begin{pmatrix} \sigma_r & 0 \\ 0 & \sigma_z \end{pmatrix},$$

y que incluye la anisotropía del material en las direcciones radial (σ_r) y vertical (σ_z). En la zona del óxido se asume una conductividad casi nula. La ecuación (1) se resuelve en 2D solamente en la zona p . Esta aproximación es razonable teniendo en cuenta que la conductividad en la zona n es mucho mayor. Si se asume que el contacto n está a 0 V, entonces la zona n , hasta la barrera inferior del QW, puede considerarse como una región equipotencial con $\phi = 0$.

Suponiendo que las densidades de electrones y de huecos en el QW son iguales, la distribución de la densidad de portadores en esta región, $n(r)$, se describe mediante una ecuación de balance 1D en la dirección radial:

$$D_n \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial n}{\partial r} \right] + \frac{J_{qw}}{qd_{qw}} - \frac{n}{\tau} - v_g S g_0 \ln \left(\frac{n}{n_{tr}} \right) = 0 \quad (2)$$

donde D_n es el coeficiente de difusión ambipolar, $J_{qw}(r)$ es la densidad local de corriente inyectada en el pozo, q es la carga del electrón, d_{qw} es el espesor del QW, v_g es la velocidad de grupo, τ es el tiempo de vida efectivo de portadores, que aglutina los efectos de las recombinaciones espontánea y no-radiativa y otros mecanismos de pérdidas. El último término de la expresión (2) corresponde a la recombinación estimulada de portadores, que es proporcional a la densidad local de fotones, $S(r)$, y a la ganancia del material. Esta última se ha modelado siguiendo una relación logarítmica con la densidad de portadores n , mediante dos parámetros, g_0 y n_{tr} .

La diferencia entre los pseudoniveles Fermi de electrones y huecos en el QW es igual al potencial electrostático en la barrera superior del QW, ϕ_{qw} , (dado que $\phi = 0$ en la barrera inferior). Considerando una única banda, ϕ_{qw} se calcula como:

$$\phi_{qw} = \frac{E_g}{q} + \frac{kT}{q} \ln \left[\left(e^{n/N_C} - 1 \right) \left(e^{n/N_V} - 1 \right) \right], \quad (3)$$

donde N_C y N_V son las densidades de estados efectivas para la banda de conducción y de valencia, respectivamente, y E_g es la energía de la banda prohibida en el QW. El perfil de potencial $\phi_{qw}(r)$ proporciona la condición de contorno en el borde inferior de la zona de resolución de la Ec. (1).

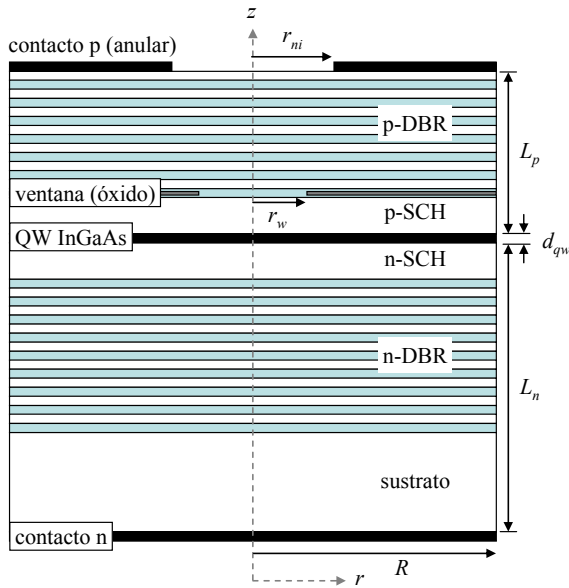


Fig. 1. Sección longitudinal de un VCSEL típico con oxidación lateral.

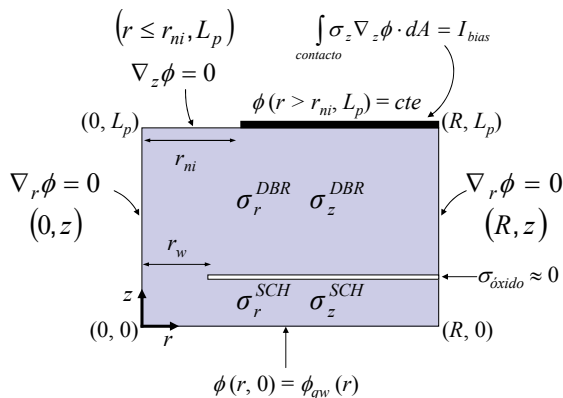


Fig. 2. Geometría simplificada de un VCSEL con oxidación lateral según el modelo y condiciones de contorno.

La Fig. 2 muestra la geometría simplificada del VCSEL para la resolución de la Ec. (1) junto con las condiciones de contorno impuestas.

La densidad de fotones $S(r)$ en el pozo cuántico se calcula inicialmente para un número fijo de fotones en la cavidad, S_0 , distribuidos según el perfil del modo óptico considerado.

Las ecuaciones (1) y (2) se resuelven de forma autoconsistente utilizando un método de diferencias finitas y siguiendo un esquema iterativo, dados una corriente de polarización, I_{bias} , y un S_0 fijos, tal y como se muestra en el diagrama de flujo de la Fig. 3. Se aplican condiciones de contorno del tipo Neumann en los bordes exteriores excepto en los contactos, donde se usan condiciones de Dirichlet.

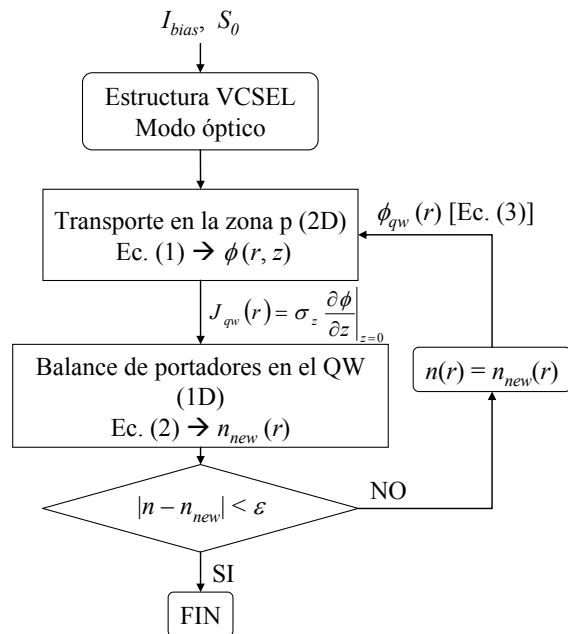


Fig. 3. Diagrama de flujo del programa de simulación.

TABLA I
Estructura de capas del VCSEL simulado.

Capa	Espesor (nm)	Material
p-DBR, 24 pares	69.49	GaAs
	79.63	AlGaAs
Apertura-óxido	69.49	GaAs
	31.83	AlGaAs
	15.93	AlAs ($r < r_w$)
		AlOx ($r > r_w$)
	31.85	AlGaAs
Cavidad λ	n-SCH	136.49 GaAs
	QW	5.00 InGaAs
	p-SCH	136.49 GaAs
n-DBR, 29.5 pares	79.63	AlGaAs
	69.49	GaAs
Sustrato		GaAs

TABLA II
Parámetros de la estructura simulada.

Parámetro	Valor
Temperatura ambiente, T	298 K
Conductividad eléctrica, σ_r, σ_z	20, $1.5 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$
Coeficiente de difusión, D_n	$20 \text{ cm}^2/\text{s}$
Tiempo de vida efectivo, τ	1 ns
Parámetro de ganancia, g_0	2100 cm^{-1}
Dens. portadores transparencia, n_{tr}	$1.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Radio, R	$20 \mu\text{m}$
Apertura del contacto p , r_{ni}	$6 \mu\text{m}$
Apertura del óxido, r_w	$3 \mu\text{m}$

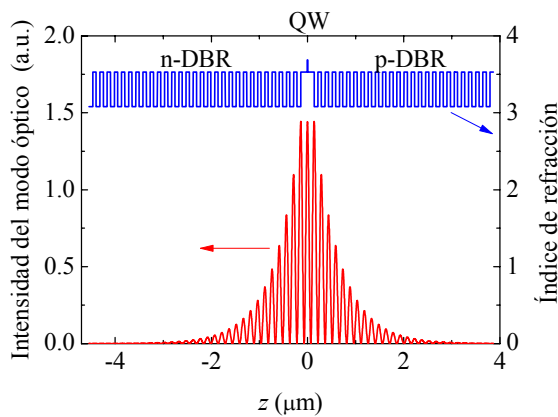


Fig. 4. Perfil de la intensidad del modo óptico en la dirección vertical junto con el perfil de índice de refracción de la estructura simulada.

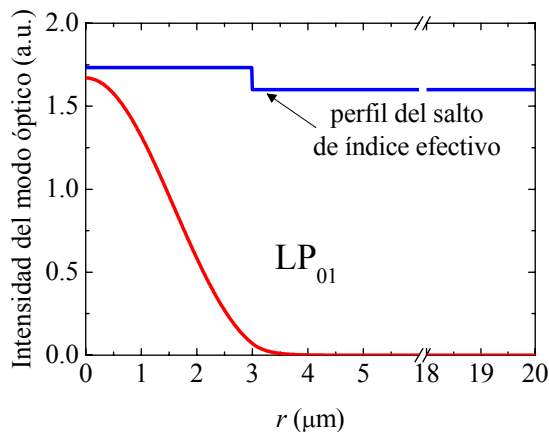


Fig. 5. Perfil de la intensidad del modo transversal fundamental LP_{01} en la dirección radial para la estructura simulada, donde la apertura en el óxido es de $3 \mu\text{m}$ de radio.

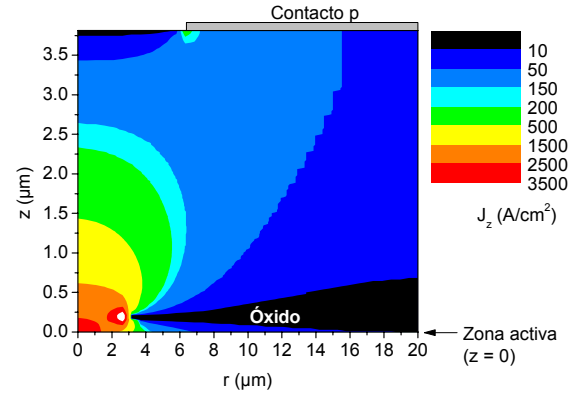


Fig. 6. Mapa de la densidad de corriente en la zona p , para $I_{bias} = 0.84 \text{ mA}$ y $S_0 = 10^4$.

3. Resultados de las simulaciones

Se ha simulado el comportamiento eléctrico de un VCSEL con oxidación lateral emitiendo a 980 nm , cuya estructura de capas se muestra en la Tabla I. Se ha tomado esta estructura como punto de referencia debido a los numerosos trabajos existentes sobre ella dentro de la acción europea COST265 [5]. Las aperturas del contacto y de la ventana de óxido son de 6 y $3 \mu\text{m}$ de radio, respectivamente. Las simulaciones se han centrado en el modo transversal fundamental LP_{01} . Los parámetros específicos que son utilizados en las simulaciones se recogen en la Tabla II. Las Figs. 4 y 5 muestran los perfiles del modo óptico en las direcciones vertical y radial, respectivamente, para la estructura simulada.

Se han realizado diversas simulaciones variando la corriente inyectada y el número de fotones en la cavidad, obteniéndose resultados razonables a nivel cualitativo. La Fig. 6 muestra un mapa de la densidad de corriente vertical en la zona de resolución 2D (zona p) en condiciones de alto número de fotones. Se observa claramente la alta densidad de corriente en los bordes de la ventana del óxido (*current crowding*). Este fenómeno se relaja para regiones cada vez más alejadas de esa zona, en mayor o menor grado, dependiendo del número de fotones.

En la Fig. 7 se muestran los perfiles laterales de la densidad de portadores y de la densidad de corriente en el pozo cuántico para una corriente de aproximadamente 0.84 A para dos valores de S_0 . Se observa que el modelo reproduce el fenómeno de quemado espacial de portadores (*spatial hole burning*, SHB) cuando el número de fotones es alto, debido a la alta recombinación estimulada en el centro de la región activa ($z = 0$). Como cabía esperar, en ambos casos la corriente queda prácticamente confinada a los límites impuestos por la apertura del óxido, aunque se observan claras diferencias entre los perfiles de corriente.

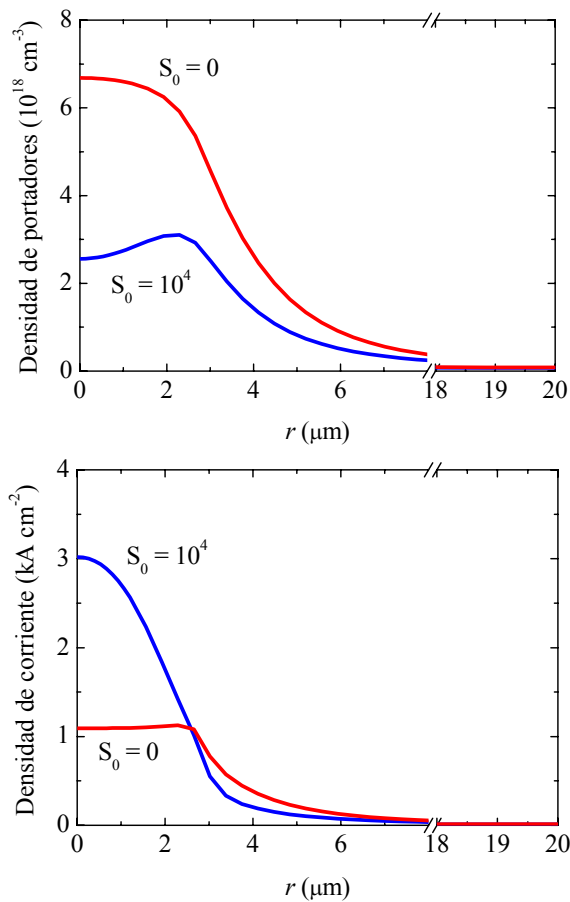


Fig. 7. Distribución lateral de la densidad de portadores (arriba) y de la densidad de corriente (abajo) en el pozo cuántico, para un número de fotones $S_0 = 0$ y $S_0 = 10^4$ y una corriente de inyección de 0.84 mA.

Estas diferencias son debidas a la autodistribución de corriente (*current self-distribution*, CSD) [6]. Cuando la tasa de recombinación estimulada es alta aparece el SHB, que a su vez dispara el efecto de CSD, proporcionando más corriente a aquellas áreas donde el SHB es más acusado y contrarrestándolo en parte. Este efecto, es de prever, que tenga un fuerte impacto en la dinámica de estos dispositivos.

Para estudiar la influencia del valor de las conductividades, se han llevado a cabo simulaciones variando sus valores nominales. La Fig. 8 muestra un ejemplo de los resultados obtenidos, en donde puede apreciarse que una disminución de la componente radial de la conductividad conlleva un aumento de la densidad de corriente en la región central de la zona activa. La misma tendencia, aunque menos acusada, se ha observado cuando se aumenta la componente vertical de la conductividad. Este resultado pone de manifiesto la importancia de calibrar los valores de conductividad para una estructura de capas dada, si se quiere obtener predicciones a nivel cuantitativo.

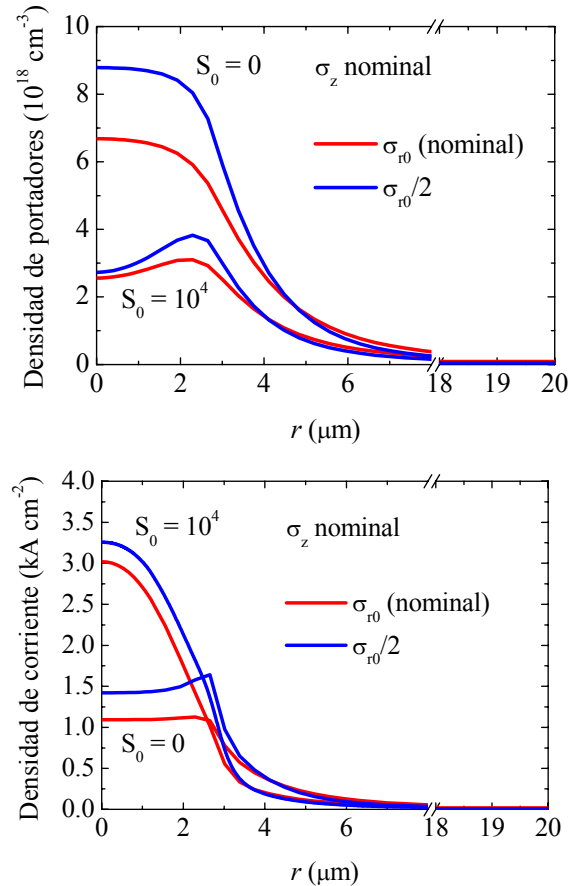


Fig. 8. Dependencia con la componente radial de la conductividad de la distribución lateral de densidad de portadores (arriba) y de densidad de corriente (abajo) en el pozo cuántico. $I_{bias} = 0.84 \text{ mA}$.

4. Conclusión

Se ha presentado y aplicado un modelo eléctrico de simulación 2D simplificado para VCSELs con oxidación lateral que reproduce correctamente el comportamiento cualitativo de estas estructuras, poniendo de manifiesto el fenómeno de autodistribución de corriente. Esto abre la posibilidad de implementar este modelo simplificado en modelos dinámicos más complejos sin suponer un gran incremento del tiempo de computación.

Agradecimientos

Los autores agradecen a S. Balle por los productivos debates y a A. Valle por su aportación del perfil lateral del modo óptico. Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia a través del proyecto TEC2006-13887-C05-01 y por el Instituto Juan Gil-Albert de la Diputación Provincial de Alicante a través de una acción de Ayudas a la Investigación.