

INFLUENCIA DE LA ALTURA DEL CONTACTO EN LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA Y RESISTENCIA TÉRMICA EN DIODOS LÁSER DE GaInNAs

INFLUENCE OF RIDGE HEIGHT IN THE TEMPERATURE DISTRIBUTION AND THERMAL RESISTANCE OF GaInNAs LASER DIODES

A. ABELENDA^{a†}, I. DELGADO^b Y M. SÁNCHEZ^c

a) IMRE, Universidad de La Habana, La Habana; aabelenda@imre.oc.uh.cu[†]

b) Instituto de Geofísica y Astronomía, La Habana; idelgado@iga.cu

c) Facultad de Física, Universidad de La Habana; maruchy@fisica.uh.cu

[†] autor para la correspondencia

Los diodos láser utilizados en los actuales sistemas de comunicación por fibra óptica son de GaInPAs. Estos poseen un pobre desempeño térmico por lo que se trata sustituirlos por láseres de otros materiales como GaInNAs. En este trabajo se presenta un estudio de la influencia de la altura del contacto "ridge" en la distribución de temperaturas en diodos láser de GaInNAs. Para hallar esta distribución resolvimos la ecuación de conducción del calor mediante el Método de las Diferencias Finitas y utilizando un modelo bidimensional de flujo de calor. La simulación se realizó en *Mathematica 7.0* variando: el largo del diodo, la cantidad de pozos en la zona activa y la altura del contacto tipo "ridge". Se calculó la resistencia térmica (Rt) de los dispositivos y se comparó con resultados experimentales reportados por otros autores obteniéndose un buen acuerdo. Los resultados indican las potencialidades de los láseres de GaInNAs.

At present the laser diodes used in optical fiber communications systems are based on GaInPAs. These lasers have a bad thermal performance and promising substitutes are GaInNAs lasers. In this paper a study of influence of the ridge height on the temperature distribution in GaInNAs laser diodes is presented. To find the temperature distribution the heat conduction equation was solved using the Finite Difference Method and a two-dimensional model of heat flow. The simulation was performed in *Mathematica 7.0* varying: the length of the diode, the amount of wells in the active zone and the height of the ridge contact. The thermal resistance (Rt) of the devices was calculated and compared with experimental results reported by other authors, obtaining good agreement. Our results suggest the potential of GaInNAs lasers.

PACS: Diode lasers 42.55.Px, Computer modeling and simulation 07.05.Tp, Thermal conduction in metals and alloys and semiconductors 66.70.Df

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los diodos láser (DL) utilizados en los sistemas de comunicación por fibra óptica están concentrados en la familia GaInPAs/InP. Sin embargo la corriente umbral de estos dispositivos presenta una alta sensibilidad térmica y poseen bajos valores de temperatura característica (T_0), del orden de 60 K, por lo que se utilizan acoplados a enfriadores que encarecen los costos de los sistemas de comunicación.

En la última década se ha trabajado intensamente en la obtención de láseres de GaInNAs como posible alternativa para obtener fuentes de luz que no necesiten sistemas de refrigeración. La heteroestructura formada por GaInNAs/GaAs presenta una mayor discontinuidad en la banda de conducción (*band offset*) que una de GaInPAs/InP, esto disminuye la posibilidad de fuga de portadores de la región activa y permite obtener altos valores de T_0 . A nivel de laboratorio se han reportado láseres de GaInNAs con valores de temperatura característica por encima de 150 K [1, 2].

En la práctica se utilizan diferentes parámetros para la caracterización térmica de los dispositivos. La resistencia térmica (Rt) es el parámetro que ofrece la caracterización más completa. Este parámetro se define como el cociente entre el incremento de temperatura (ΔT) de la zona activa (ZA) debido al paso de la corriente a través del láser, y la potencia total disipada (Pd) [3].

El valor de la Rt está fuertemente relacionado con parámetros geométricos como el ancho w y el tipo del contacto de franja [4, 5].

La mayoría de las estructuras fabricadas en la actualidad utilizan contactos de franja tipo mesa o *ridge*. La influencia del ancho y profundidad del *ridge* sobre la densidad de corriente umbral (J_{th}) y la temperatura característica en láseres de GaInNAs ha sido estudiada por Liu *et al.* en [6] y [7]. Sin embargo, no existen reportes de estudios de su efecto sobre la resistencia térmica de los dispositivos.

En este trabajo se presenta un estudio de la influencia de la profundidad del *ridge* y el número de pozos en la zona activa sobre la distribución de temperaturas y la resistencia térmica de diodos de GaInNAs/GaAs. Aplicando el Método de las Diferencias Finitas (MDF) y utilizando un modelo bidimensional de flujo de calor, resolvimos la ecuación de conducción del calor en el caso estacionario. Todos los cálculos y simulaciones fueron implementados en *Mathematica 7.0*. Los valores de Rt obtenidos se compararon con los reportados en la literatura observándose un buen acuerdo.

MODELO

Estructura láser. En la Figura 1 se esquematiza la estructura analizada. La misma consta de un sustrato de GaAs tipo *n* con metalización de AuGe sobre el que se crece una capa *buffer* de GaAs. La zona activa (ZA), formada por uno o varios pozos cuánticos de GaInNAs, está rodeada por barreras simétricas de GaAs para el confinamiento de los portadores. Las barreras están embebidas entre las capas *cladding* de AlGaAs tipo *n* y *p* que garantizan el confinamiento de la luz. Sobre la capa *cladding* tipo *p* se encuentra una capa p^+ de GaAs para lograr un buen contacto óhmico, y sobre esta, las capas de contacto metálico de Pt, Ti y Au.

La estructura representada corresponde a un contacto tipo *ridge*. En este tipo de láseres el contacto se define devastando una o varias capas de la estructura mediante diferentes técnicas. Se deposita una capa de SiO₂ a ambos lados del *ridge* y se depositan las capas metálicas que completan la estructura. Así el ancho del contacto se define por el ancho del *ridge*. Típicamente el ancho de este contacto varía entre 4 y 10 μm . Esto regula la inyección de corriente en una zona central, lo que permite que la luz se emita en un spot elíptico en la zona central del espejo del láser. Estos dispositivos exhiben excelentes patrones de campos lejano y cercano, con haces de forma gaussiana casi ideales lo que es importante para lograr un buen acople de la luz emitida en las fibras ópticas.

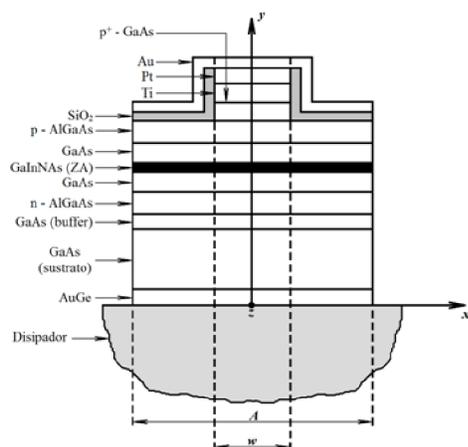


Figura 1. Corte transversal de la estructura láser con contacto tipo *ridge* en la configuración *p-up* utilizada en la simulación.

Ecuación de propagación del calor. La distribución de temperaturas $T_i(x, y, z)$ en los diferentes puntos de la estructura se puede obtener resolviendo la ecuación de conducción del calor en condiciones estacionarias y considerando la homogeneidad de las capas que la forman

$$\nabla^2 T(x, y, z) = -\frac{g(x, y, z)}{\sigma(x, y, z)} \quad (1)$$

$T(x, y, z)$ representa la temperatura en cada uno de los puntos (x, y, z) de la estructura, $g(x, y, z)$ es la densidad de calor generada en esos puntos y $\sigma(x, y, z)$ es la conductividad térmica. En la Figura 1 se indica el sistema de referencia utilizado en la solución de la ecuación (1). En este trabajo empleamos un modelo bidimensional de flujo de calor, eliminando así la dependencia de T con z . Esto constituye una primera aproximación en la solución de un problema tridimensional.

Para resolver el problema matemático que plantea la ecuación (1) debemos conocer sus condiciones de frontera. Además, la presencia de múltiples capas de diferentes materiales nos impone el uso de condiciones de continuidad del flujo de calor en el interior de la estructura. Si tenemos en cuenta que el mecanismo fundamental de extracción de calor en un DL es a través del disipador, entonces podemos decir que el flujo de calor en las paredes laterales y superiores del dispositivo es cero. Por lo tanto, para hallar la distribución de temperatura debemos resolver la expresión (1) bajo las siguientes condiciones de frontera

$$\begin{aligned} T(x, 0) &= 0 \\ \left. \frac{\partial T(x, y)}{\partial x} \right|_{x=\left\{ \begin{array}{l} \text{paredes} \\ \text{laterales} \end{array} \right\}} &= 0 & \left. \frac{\partial T(x, y)}{\partial y} \right|_{y=\left\{ \begin{array}{l} \text{paredes} \\ \text{superiores} \end{array} \right\}} &= 0 \\ \left(\sigma(x, y) \frac{\partial T(x, y)}{\partial y} \right) \Big|_{y=y_{ic}^-} &= \left(\sigma(x, y) \frac{\partial T(x, y)}{\partial y} \right) \Big|_{y=y_{ic}^+} \end{aligned} \quad (2)$$

Debido a que las dimensiones del disipador son mucho mayores que las del dispositivo y generalmente es de un material con un elevado valor de σ , podemos considerar que mantiene una temperatura constante e igual a la ambiente. En nuestro caso, fijamos la temperatura del disipador a 0 K con el objetivo obtener directamente el incremento de temperatura ΔT en los puntos (x, y) de la estructura con respecto a la temperatura ambiente.

Fuentes de calor. La fuente de calor más importante de una estructura láser se encuentra en la ZA. Consideramos que el calor generado en esta región se debe a la recombinación no radiativa (RNR), a la reabsorción de portadores libres (RPL) y al efecto Joule (EJ). La densidad de calor generada por estos mecanismos viene dada por [8]

$$g_{ZA}(x, y) = \frac{V_0}{t_{ZA}} \left[J + (J_{th} - J) \eta_D \right] + \rho_{ZA} \cdot J^2 \quad (3)$$

En esta expresión V_0 es el voltaje de la juntura *p-n*, t_{ZA} el espesor de la ZA, J la densidad de corriente que pasa por el dispositivo, J_{th} la densidad de corriente umbral, η_D la eficiencia cuántica diferencial y ρ_{ZA} la resistividad eléctrica de la ZA.

En el resto de las capas sólo consideramos el efecto Joule como fuente de generación de calor.

$$g_{capas}(xy) = \rho_{capas} \cdot J^2 \quad (4)$$

En los cálculos se considera el confinamiento ideal de la corriente en la región delimitada por el contacto, por lo que sólo se genera calor en la franja de espesor w representada en la Figura 1.

Método de las Diferencias Finitas. La base del Método de las Diferencias Finitas (MDF) es la discretización de un dominio continuo al cual se le asocia un grupo de ecuaciones diferenciales. El objetivo de esta transformación es construir un sistema de ecuaciones lineales que simplifique la solución numérica del problema. Para obtener las aproximaciones en diferencias de los operadores diferenciales utilizamos el modelo de tres puntos [9].

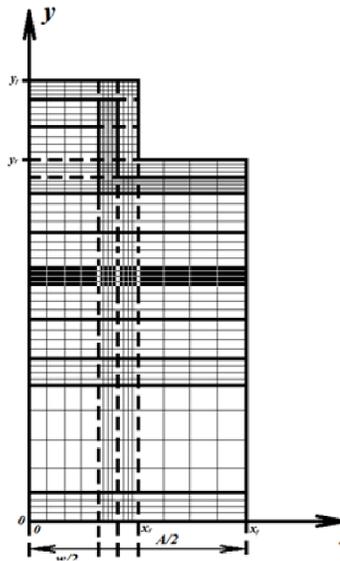


Figura 2. Discretización de la estructura láser sobre la cual realizaremos los cálculos utilizando el MDF.

En nuestro caso, el dominio sobre el cual está definido el sistema de ecuaciones formado por (1) y (2) es la estructura láser. Debido al sistema de referencia que escogimos (Figura 1) la distribución de temperaturas es simétrica respecto al eje y . Esto reduce a la mitad la cantidad de ecuaciones del sistema lineal, pero nos obliga a introducir una nueva condición de frontera

$$T(0^-, y) = T(0^+, y) \quad (5)$$

Las estructuras comerciales están formadas por capas de espesores muy diferentes entre sí y el ancho del *ridge* generalmente es mucho menor que el ancho del dispositivo. Por lo tanto, al discretizar la estructura láser, debemos asociarle una malla irregular donde las filas y las columnas de nodos no están equiespaciadas.

Si aplicamos el modelo de tres puntos a la ecuación (1) obtenmos

$$\left(\begin{aligned} & \frac{T_{i-1,j}}{h_i(h_i+h_{i+1})} + \frac{T_{i,j-1}}{k_j(k_j+k_{j+1})} \\ & - \left(\frac{1}{h_i h_{i+1}} + \frac{1}{k_j k_{j+1}} \right) T_{i,j} + \\ & + \frac{T_{i,j+1}}{k_{j+1}(k_j+k_{j+1})} + \frac{T_{i+1,j}}{h_{i+1}(h_i+h_{i+1})} \end{aligned} \right) = -\frac{g_{i,j}}{2 \cdot \sigma_{i,j}} \quad (6)$$

donde el subíndice i corre a lo largo del eje x y el subíndice j a lo largo del eje y , la separación entre los puntos x_{ij} y $x_{i+1,j}$ es h_i y k_i es la distancia entre los nodos x_{ij} y $x_{i,j+1}$ respectivamente. Esta expresión se corresponde con el caso más general posible y podrá ser simplificada de acuerdo con el punto (i, j) en el que estemos realizando los cálculos.

La condición de frontera correspondiente a $y = 0$ podemos escribirla de la forma

$$T_{i,0} = 0. \quad (7)$$

En tanto las condiciones de frontera para las paredes laterales y superiores podemos escribirlas de la forma

$$T_{n-2,j} - 4T_{n-1,j} + 3T_{n,j} = 0, \text{ si } \begin{cases} x = x_r \wedge y_r < y < y_f \\ x = x_f \wedge 0 < y < y_r \end{cases} \quad (8)$$

$$T_{i,m-2} - 4T_{i,m-1} + 3T_{i,m} = 0, \text{ si } \begin{cases} y = y_r \wedge x_r < x \leq x_f \\ y = y_f \wedge 0 \leq x \leq x_r \end{cases}$$

Para la condición de paridad de T , planteada en la expresión (5), podemos utilizar la ecuación (6). En este caso debemos considerar que $T_{-1,j} = T_{1,j}$ y $h_i = h_{i+1} = h$, por lo tanto obtenmos:

$$\left(\begin{aligned} & \frac{T_{0,j-1}}{k_j(k_j+k_{j+1})} - \left(\frac{1}{h^2} + \frac{1}{k_j k_{j+1}} \right) T_{0,j} + \\ & + \frac{T_{0,j+1}}{k_{j+1}(k_j+k_{j+1})} + \frac{T_{i+1,j}}{h^2} \end{aligned} \right) = -\frac{g_{i,j}}{2 \cdot \sigma_{i,j}} \quad (9)$$

Para las condiciones de continuidad del flujo de calor en las fronteras entre dos capas diferentes de la estructura se utilizan las expresiones

$$\left(\begin{aligned} & \frac{\sigma_{i,j}}{k_j} T_{i,j-2} - 4 \frac{\sigma_{i,j}}{k_j} T_{i,j-1} + 3 \left(\frac{\sigma_{i,j}}{k_j} + \frac{\sigma_{i,j+1}}{k_{j+1}} \right) T_{i,j} - \\ & - 4 \frac{\sigma_{i,j+1}}{k_{j+1}} T_{i,j+1} + \frac{\sigma_{i,j+1}}{k_{j+1}} T_{i,j+2} \end{aligned} \right) = 0. \quad (10)$$

Debido a la forma de la capa de óxido (Figura 1), es necesario utilizar condiciones de continuidad del flujo para fronteras horizontales en zonas determinadas. En estos casos utilizaremos una expresión similar a

la (10), donde debemos sustituir los k_j por los h_i y correr a lo largo del subíndice i en lugar del j .

Parámetros de la estructura. Para la simulación se escogió una estructura típica, similar a la reportada por Borchert *et al.* en [10] y [11]. En la Tabla I se listan los valores de: espesor (t), resistividad eléctrica (ρ) y conductividad térmica (σ), así como las fuentes de calor consideradas en cada una de las capas para una estructura con un solo pozo (SQW) en la zona activa.

Dado que el GaInNAs es un material relativamente nuevo, del cual no existen aún muchos datos en la literatura, la conductividad térmica se obtuvo por interpolación de los compuestos binarios. Para esto, utilizamos los datos reportados en [12], [13] y [14].

Para el análisis de estructuras con más de un pozo en la zona activa se consideraron barreras interpozo de GaInNAs de 20 nm de espesor con menor concentración de In (la concentración de nitrógeno se mantuvo igual a la del pozo). La composición habitual de In que se usa en las barreras es de entre 4 y 5 %. Esta diferencia con respecto a la concentración de In en la zona activa no tiene gran influencia sobre la conductividad térmica, por lo que tanto esta, como la resistividad eléctrica, se tomaron iguales a la de los pozos y se consideró que en ellas sólo se genera calor por efecto Joule.

Capa		Generación de calor	Espesor (μm)	σ (W/mK)	ρ (Ωm)
Material	Descripción				
Au	Contacto metálico	EJ	1	317	$2.3 \cdot 10^{-8}$
Pt		EJ	0.13	71.6	$1.1 \cdot 10^{-7}$
Ti		EJ	0.02	21.9	$4.3 \cdot 10^{-7}$
p^+ -GaAs	Contacto p	EJ	0.2	44	$2.6 \cdot 10^{-4}$
$p\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	Cladding	EJ	1.5	11.4	$7.9 \cdot 10^{-3}$
GaAs	Barrera	EJ	0.15	44	$2.6 \cdot 10^{-4}$
$\text{Ga}_{0.64}\text{In}_{0.36}\text{N}_{0.018}\text{As}_{0.982}$	ZA	RNR EJ RPL	0.006	37.8	$2.5 \cdot 10^{-4}$
GaAs	Barrera	EJ	0.15	44	$9.2 \cdot 10^{-4}$
$n\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$	Cladding	EJ	1.5	11.4	$3.4 \cdot 10^{-3}$
$n\text{-GaAs}$	Buffer	EJ	1	44	$9.2 \cdot 10^{-6}$
$n\text{-GaAs}$	Substrato	EJ	100	44	$9.2 \cdot 10^{-6}$
AuGe	Contacto metálico	EJ	0.3	150	$2.4 \cdot 10^{-6}$
SiO_2	Óxido metálico	–	0.2	1.47	–

EJ – Efecto Joule
RNR – Recombinación no radiativa
RPL – Recombinación de portadores libres

Es conocido que la configuración o modo en que se coloca el dispositivo sobre el disipador tiene una gran influencia sobre la resistencia térmica [15-17]. Un DL montado en configuración $p\text{-up}$

(sustrato unido al disipador) sufrirá un calentamiento significativamente mayor que si se monta en configuración $p\text{-down}$ (contacto p unido al disipador). En nuestro caso, partiendo de una estructura en configuración $p\text{-up}$, variamos la altura del *ridge*, la cantidad de pozos y el largo del dispositivo para estudiar su influencia en la distribución de temperaturas y la Rt del láser.

Se consideraron 3 alturas del *ridge*:

- *Ridge* de altura $h1$: formado por la metalización y la capa p^+ .
- *Ridge* de altura $h2$: formado por la metalización, la capa p^+ y la *cladding*.
- *Ridge* de altura $h3$: formado por la metalización, la capa p^+ , la *cladding* y la barrera.

Para estimar la densidad de potencia en forma de calor generada en la zona activa, además de los parámetros recogidos en la Tabla I, se necesitan algunos parámetros de operación y geométricos del dispositivo. En la Tabla II se listan los parámetros utilizados en la simulación para un DL reportado en [11].

Parámetro	Valor
Largo del dispositivo (μm)	350
Ancho del dispositivo (μm)	300
Ancho del <i>stripe</i> (μm)	4
Voltaje de codo (V)	2.5
Corriente umbral (A)	0.021
Resistencia serie (W)	10
Eficiencia cuántica diferencial	0.45

RESULTADOS

Distribución de temperatura. En la Figura 3 presentamos la distribución de temperatura obtenida para un láser SQW de GaInNAs igual al esquematizado en la Figura 1. Cada gráfico corresponde a una altura del *ridge* dada. Estas gráficas muestran como el máximo calentamiento del dispositivo ocurre en la zona activa. Se puede apreciar además que con el aumento de la profundidad del *ridge* (mayor número de capas en el *ridge*), el incremento de temperatura en el dispositivo es mayor.

	ΔT (K)					
	Configuración $p\text{-up}$			Configuración $p\text{-down}$		
	r1	r2	r3	r1	r2	r3
1 QW	11.3	18.1	20.9	3.03	2.95	3.20
2 QW	21.0	33.3	38.4	5.80	5.63	6.09
3 QW	30.6	48.1	55.4	8.52	8.26	8.90

Este resultado es lógico ya que al aumentar la profundidad del *ridge* disminuye el volumen para “disipar” el calor generado en la zona activa. Esto se aprecia mejor en la Figura 4 donde se muestran los perfiles de temperatura correspondientes a los puntos de coordenadas (0, y) en la dirección perpendicular al

plano de la juntura, para este dispositivo. Aunque ha sido reportado que un contacto *ridge* donde se elimine la capa *cladding* favorece la disminución de la corriente de fuga lateral en los dispositivos [6, 7], nuestros resultados indican que en para una evacuación más eficiente del calor es recomendable la eliminación de una sola capa (la p^+ -GaAs).

Como se observa el incremento en la temperatura en la zona activa al variar de $N = 1$ a $N = 3$ es de 19.3 K. Nótese que al triplicar el número de pozos prácticamente se triplica la temperatura en la zona activa, lo que es razonable ya que estamos triplicando el número de fuentes de calor en prácticamente el mismo volumen. Esto indica que no es conveniente utilizar un número grande de pozos en la zona activa si se quiere minimizar el incremento de temperatura en el dispositivo.

A modo de comparación repetimos los cálculos para el dispositivo en la configuración *p-down*. En este caso como era de esperar el incremento de temperatura en el dispositivo es mucho menor que el obtenido en la configuración *p-up*. En la Tabla III hemos resumido los valores del incremento de temperatura (ΔT) en la zona activa para los diferentes casos simulados.

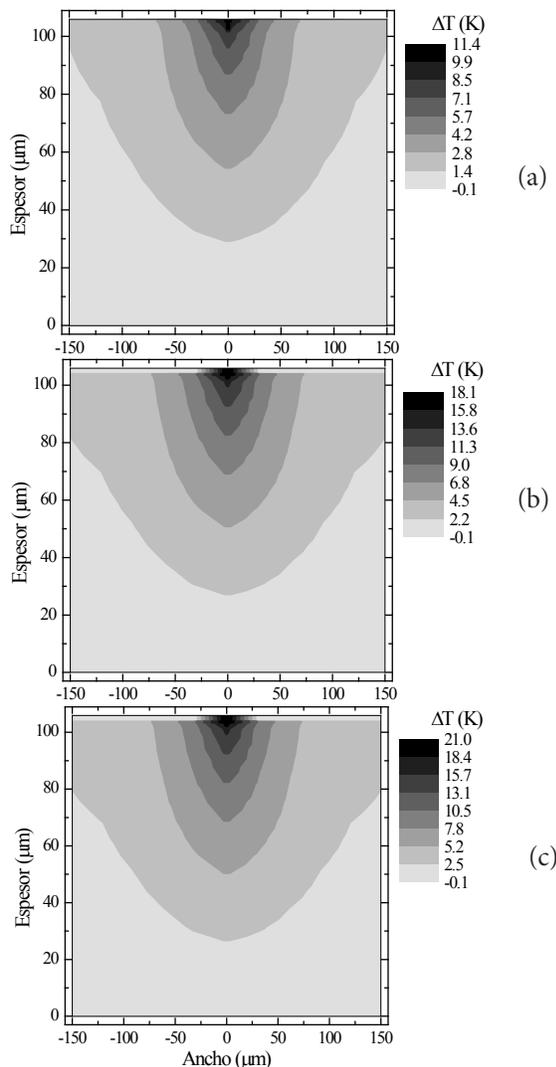


Figura 3. Distribución de temperatura para un DL SQW de GaInNAs con contacto de franja tipo *ridge* en configuración *p-up*. (a) *Ridge* de altura h_1 . (b) *Ridge* de altura h_2 . (c) *Ridge* de altura h_3 .

Para estudiar la influencia del número de pozos N , se calculó la distribución de temperaturas en función de N para un dispositivo con altura del *ridge* h_1 . En la Figura 5 se presentan los perfiles obtenidos.

Los resultados muestran que en la configuración *p-down* un dispositivo con *ridge* de altura h_2 es el que sufre el menor incremento de temperatura. Este hecho puede estar relacionado con la presencia de la capa *cladding* p -AlGaAs fuera del *ridge*, que permite una mayor disipación del calor. Esto no ocurre en el dispositivo con igual altura de *ridge* h_2 en configuración *p-up* porque en este caso el flujo de calor está en sentido contrario a las capas que se eliminan.

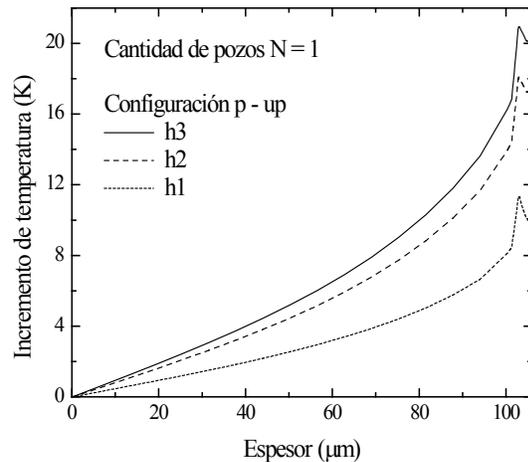


Figura 4: Perfil de temperatura en los puntos de coordenadas $(0, y)$ de un láser SQW para diferentes alturas del *ridge*.

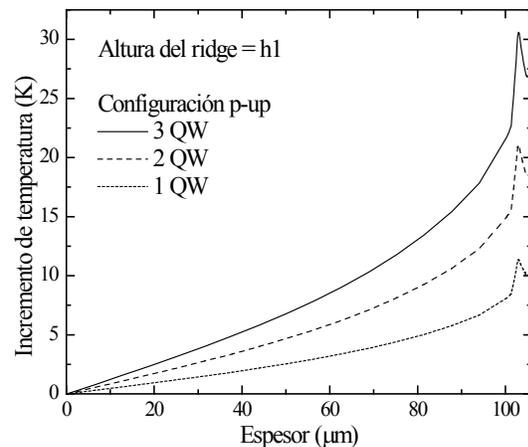


Figura 5. Perfil de temperatura en los puntos de coordenadas $(0, y)$ de un láser con altura h_1 del *ridge* para distintas cantidades de pozos cuánticos.

Resistencia térmica de los dispositivos. Para calcular la dependencia de Rt con la altura del *ridge* y el largo del dispositivo utilizamos la expresión

$$Rt = \frac{\Delta T}{I \cdot (V_0 + R_s \cdot I)} \quad (11)$$

donde I es la corriente de operación del dispositivo tomada como 1.2 veces la corriente umbral, V_0 es el voltaje de codo, R_s la resistencia serie y ΔT el incremento de temperatura obtenido en la simulación anterior para las distintas alturas del *ridge*. En la Figura 6 se muestran los valores de Rt obtenidos para cada una de las alturas del *ridge*, consideradas para un DL de GaInNAs en la configuración *p-up* y un largo de 350 μm .

Como se observa, la resistencia térmica del dispositivo aumenta a medida que se incrementa la altura del *ridge*, en correspondencia con el incremento de temperatura que experimenta la zona activa.

En la Figura 7 presentamos las curvas de Rt en función del largo del dispositivo para dispositivos en configuración *p-up*, con altura del *ridge* $h1$ y dispositivos con 1, 2 y 3 pozos en la zona activa. A modo de comparación, se incluyeron los valores de Rt calculados según el método descrito en [21] para dispositivos reportados en la literatura. Como se observa en la figura, se encontró una buena concordancia entre los resultados de la simulación y los valores experimentales, aunque no es posible hacer una comparación exacta debido a las diferencias específicas de estas estructuras con respecto a la utilizada en los cálculos.

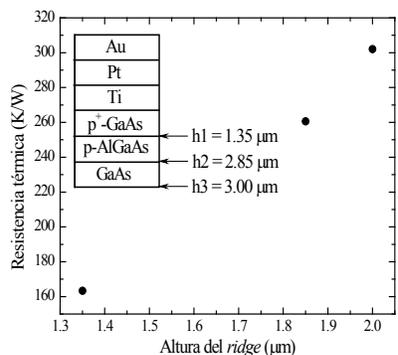


Figura 6: Gráfico de Altura del *ridge* vs. Rt para un DL de GaInNAs en la configuración *p-up* y un largo de 350 μm .

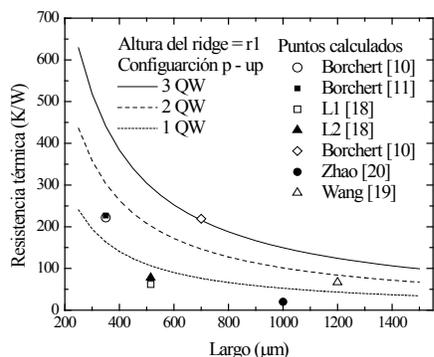


Figura 7. Gráfico de Rt vs. L para un DL de GaInNAs en la configuración *p-up* y una altura $h1$ del *ridge*, y puntos experimentales calculados según el método reportado en [21].

Es importante señalar que los valores de Rt por debajo de 100 K/W , en particular el valor de 26 K/W obtenido para el dispositivo de la estructura reportada en [20], indican las potencialidades de los diodos láseres de GaInNAs como alternativa a los de GaInPAs utilizados en los actuales sistemas de comunicación por fibra óptica.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que el aumento de la cantidad de pozos en la zona activa conduce a un incremento significativo del calor generado y, por lo tanto, de la temperatura alcanzada por el DL. Un resultado importante es que el incremento de temperatura del dispositivo, en configuración *p-up*, es proporcional a la altura del *ridge*. Este hecho está relacionado con la disminución del volumen del dispositivo que sirve para la disipación del calor. Esto indica que para la evacuación más eficiente del calor es recomendable la eliminación de una sola capa (la p^+ -GaAs), es decir, un contacto *ridge* de altura $h1$. Estos resultados evidencian la necesidad de un proceso de optimización que incluya el efecto de todos los parámetros analizados.

En cuanto a la resistencia térmica, los valores obtenidos indican las potencialidades de los láseres de GaInNAs como alternativa a los de GaInPAs utilizados en los actuales sistemas de comunicación por fibra óptica.

[1] M. Hopkinson, C.Y. Jin, H.Y. Liu, P. Navaretti and R. Airey, *Elect. Lett.* **42**, 923 (2006)
 [2] S. M. Wang, P. Modh, Y. Q. Wei, M. Sadeghi and A. Larsson, *Elect. Lett.* **41**, 743 (2005)
 [3] J. I. Pankove, *Optical processes in semiconductors*, (Dover Publications Inc., New York, 1971)
 [4] M. C. Amann, *Appl. Phys. Lett.* **50**, 4 (1987)
 [5] M. Yano, H. Imai, K. I. Hori and M. Takusagawa, *IEEE J. Quantum Elect.* **17**, 619 (1981)
 [6] C. Y. Liu, Y. Qu, S. Yuan and S. F. Yoon, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 4594 (2004)
 [7] C. Y. Liu, S. F. Yoon, W. J. Fan, A. Uddin and S. Yuan, *IEEE Photonics Technol. Lett.* **18**, 791 (2006)
 [8] B. Mroziec, M. Bugajski and W. Nakwaski, *Physics of semiconductors lasers*, (PWN – Polish Scientific Publishers, Warszawa, 1991)
 [9] M. Álvarez, A. Gómez, A. Guerra y R. Lau, *Matemática numérica*, (Editorial Félix Varela, La Habana, 1998)
 [10] B. Borchert, A. Egorov, S. Illek, M. Komainda and H. Riechert, *Elect. Lett.* **35**, 2204 (1999)
 [11] B. Borchert, A. Y. Egorov, S. Illek and H. Riechert, *IEEE Photonics Technol. Lett.* **12**, 597 (2000)

- [12] R. E. Bolz and G. L. Tuve, *CRC Handbook of tables for applied engineering science*, 2nd Edition, (CRC Press, Boca Raton, 1973)
- [13] M. Levinshtein, S. Ruminatsev and M. Shur, *Handbook series on Semiconductor Parameters*, Vol. 2, (World Scientific, London, 1999)
- [14] J. C. Dymant., Y. C. Cheng and A. J. Spring Thorpe, *J. Appl. Phys.* **49**, 2683 (1975)
- [15] A. G. Steventon, R. E. Spillet, R. E. Hobbs, M. G. Burt, P. J. Fiddymont and J. V. Collins, *IEEE J. Quantum Elect.* **17**, 602 (1981)
- [16] O. J. F. Martin, G. L. Bona and P. Wolf, *IEEE J. Quantum Elect.* **28**, 2582 (1992)
- [17] W. Both and J. Piprek, *J. Therm. Anal.* **36**, 1441 (1990)
- [18] B. Messant, "Conception, réalisation et caractérisation de diodes laser InGaAsN/GaAs à diaphragme d'oxyde pour les télécommunications optiques á 1.3 μm ". Tesis de Doctorado, Laboratoire d'Analyse et d'Architecture es Systèmes du CNRS (LAAS), 2006
- [19] S. M. Wang, Y. Q. Wei, X. D. Wang, Q. X. Zhao, M. Sadeghi and A. Larsson, *J. Cryst. Growth* **278**, 734 (2005)
- [20] H. Zhao, G. Adolfsson, S. M. Wang, M. Sadeghi and A. Larsson, *Elect. Lett.* **44**, 416 (2008)
- [21] R. Pernas, A. Abelenda y M. Sánchez, *Rev. Cub. Fis.* **27**, 238 (2010)