

# Internet Electronic Journal Nanociencia et Moletrónica

Marzo 2004, Vol. 2; N°1, págs. 163-178

**El problema microfotónico de un emisor zero-dimensional dentro  
de un medio con absorción inhomogénea**

**F. Rodríguez<sup>1</sup>, A. Ramírez<sup>2</sup>, A. Zehe<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias de la Computación de la BUAP

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias de la Electrónica, Posgrado.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Puebla, Pue., México

Email: [aramirs@siu.buap.mx](mailto:aramirs@siu.buap.mx)

recibido: Noviembre 12, 2003

revisado: Marzo 22, 2004

publicado: Junio 29, 2004

Citation of the article:

F. Rodríguez, A. Ramírez, A. Zehe, "El problema microfotónico de un emisor zero-dimensional dentro de un medio con absorción inhomogénea", Internet Electrón. J. Nanocs. Moletrón. 2004, 2(1), 163-178:

<http://www.revista-nanociencia.ece.buap.mx>

## **El problema microfotónico de un emisor zero-dimensional dentro de un medio con absorción inhomogénea**

**F. Rodríguez<sup>1</sup>, A. Ramírez<sup>2</sup>, A. Zehe<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias de la Computación de la BUAP

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias de la Electrónica, Posgrado.  
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Puebla, Pue., México

Email: aramirs@siu.buap.mx

recibido: Noviembre 12, 2004

revisado: Marzo 22, 2004

publicado: Junio 29, 2004

---

*Internet Electron. J. Nanocs. Moletrón. 2004, 2(1), pags. 163-178*

### **Resumen**

La propagación de la luz alrededor de un emisor local, situado dentro de un medio con absorción óptica no-homogénea es un caso general práctico. Ocurre por ejemplo al caer una partícula cósmica en un medio de frenado para su detección, o en la emisión de un punto cuántico dentro de una estructura semiconductor, tal como la intensidad de luz en el campo cercano de un diodo emisor de luz (LED), el cual es calculado con una especial función de absorción en la región de excitación de luz.

En el presente trabajo simulamos un espacio con absorción óptica inhomogénea a través de una unión p-n, donde para una línea espectral de frecuencia  $\omega_p$  la absorción óptica en la región  $n$  tenga un valor pequeño y constante, mientras hacia la profundidad de la región  $p$  la absorción óptica crezca fuertemente con la coordenada  $x_p$  según la función  $\alpha(\omega_p, x_p) = A(\omega_p) - B(\omega_p) \cosh^{-2} a(\omega_p) x_p$ . La emisión surge de un punto cuántico situado dentro de la región  $p$ , es decir  $x_p > 0$ . Determinamos las superficies de intensidad constante alrededor del emisor singular y mostramos una dependencia característica entre la forma de superficies y los parámetros de la función de absorción óptica inhomogénea. Estos cálculos encuentran aplicación en la determinación del campo cercano de emisores planares inmersos en un medio de absorción óptica inhomogénea, como por ejemplo una unión  $p-n$  en estructura FABRY-PEROT.

## 1 Introducción

Los dispositivos optoelectrónicos de semiconductores, cuyo representantes principales son diodos láser, diodos luminiscentes, sensores ópticos y celdas solares, han encontrado tanto un amplio estudio básico de los procesos físicos y tecnológicos, como también aplicaciones muy amplias en laboratorios, e incluso en la vida cotidiana. Material base para estos dispositivos son semiconductores y principalmente compuestos del tipo A3-B5, como por ejemplo el arseniuro de galio (GaAs) y el silicio (Si) como representante principal de la optoelectrónica.

Los diodos fotoluminiscentes representan dispositivos optoelectrónicos de amplia aplicación, cuyo funcionamiento físico se debe a la recombinación radiativa de portadores de carga en exceso. El proceso de generación de la radiación ocurre en una región angosta, plana entre la región *n* y *p* del dispositivo. Estas dos regiones poseen una absorción óptica característica y de rápida variación especial.

La radiación generada en la región *p-n*, al propagarse hacia la región externa del diodo, tiene que pasar por las regiones absorbentes (figura 1). Dependiendo de la trayectoria que un haz de luz de un cierto punto de generación tenga que tomar, contribuye en medida diferente pero característica a la intensidad luminiscente que se forma en la superficie del dispositivo.

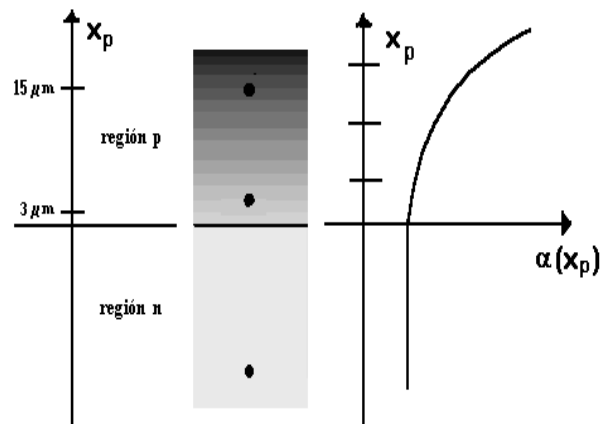


Figura 1. Absorción óptica en un medio inhomogéneo formado por una unión *p-n*. Los puntos señalados son los que en la figuras 4, 5 y 6 se aprecian.

Este trabajo se estudia superficies de intensidad constante que se generan alrededor de un emisor puntual, que está situado dentro de un medio de absorción inhomogénea. Como casos especiales se determina estas superficies situando el emisor a una absorción alta pero variable, también de una emisión dentro de una absorción constante, y además de una emisión cerca de las fronteras.

En definitiva, los dispositivos optoelectrónicos siguen siendo área de amplio estudio y de múltiples actividades de investigación y desarrollo tecnológico. El desarrollo apunta hacia dispositivos de dimensiones nanométricas.

## 2 Modelación Computacional

Cuando los dispositivos optoelectrónicos se describen a través de modelos matemáticos y al obtener la solución de estos, es posible conocer el comportamiento de los mismos antes de ser fabricados y saber su funcionamiento, permitiendo que se reduzcan los costos de fabricación y corregir posibles errores que estos muestren en la simulación de su comportamiento.

Basándose en propiedades ópticas de materiales semiconductores, se define y determina una función de absorción óptica (ecuación 2), que responde a la solución real de la unión p-n. Se programa esta función para determinar su comportamiento dependiendo de ciertos parámetros que reflejan la situación física de la unión, para encontrar concordancia entre el cálculo y mediciones experimentales conocidas.

Esta ecuación de absorción óptica se programa para determinar el comportamiento de la absorción en medios inhomogéneos mediante MATLAB, ya que nos proporciona varias funciones matemáticas y un fácil modo de graficación para visualizar mejor el comportamiento de la absorción. MATLAB es el nombre abreviado de “Matriz Laboratory”, sirve para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices. Como caso particular puede también trabajar con números escalares, tanto reales como complejos. Una de las capacidades más atractivas es la de realizar una gran cantidad de gráficos en dos y tres dimensiones, que es la razón principal de haber escogido este lenguaje de programación para este tipo de cálculos y graficaciones.

Las superficies de intensidad constante alrededor de una fuente puntual de intensidad  $I_0$  se calculan por la expresión:

$$\alpha r = \frac{2B}{a \cdot \cos \theta} \left[ \frac{\sinh(a \cdot r \cdot \cos \theta)}{\cosh(a \cdot r \cdot \cos \theta) + \cosh(a \cdot r \cdot \cos \theta + 2ax_p)} \right] \quad (1)$$

Esta ecuación describe la intensidad de radiación alrededor de un punto  $x_p$ , que depende del parámetro  $r$  en diferentes direcciones.

La programación de ésta ecuación mediante MATLAB, requiere fundamentalmente de dos procesos principales para la graficación del comportamiento de la emisión de luz alrededor de un punto específico.

El primer proceso describe en el diagrama de flujo de la figura 3. Este diagrama describe la forma de graficar la ecuación punto por punto, obteniendo los puntos mediante coordenadas polares, es decir, el vector  $r$  y el ángulo  $\theta$  formado por este vector y el eje  $x$ , convirtiéndolas a coordenadas cartesianas. MATLAB permite la graficación en coordenadas polares, pero para una mejor visualización de las gráficas se determinó hacer esta conversión.

Igualando con cero a la ecuación anterior, obtenemos la siguiente:

$$Ar - \frac{2B}{a \cdot \cos \theta} \left[ \frac{\sinh(a \cdot r \cdot \cos \theta)}{\cosh(a \cdot r \cdot \cos \theta) + \cosh(a \cdot r \cdot \cos \theta + 2ax_p)} \right] - ar = 0 \quad (2)$$

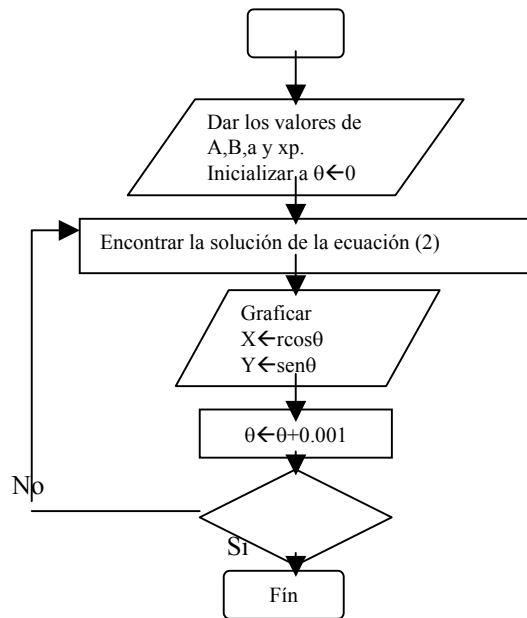


Figura 2. Diagrama de flujo para graficar la ecuación de absorción óptica.

Siendo  $r$  la variable a determinar, se obtiene una solución para cada variación del ángulo  $\theta$ , ya que este ángulo se inicializa con cero, y va sufriendo en cada ciclo pequeños incrementos, hasta llegar a los  $180^\circ$ , ya que solo necesitamos hacer los cálculos del primer y cuarto cuadrante de los ejes cartesianos, pues los otros cuadrantes son el reflejo de los calculados.  $A$ ,  $B$ ,  $a$  y  $x_p$ , actúan como constantes en la ecuación, pero el parámetro  $r$  es muy importante en el comportamientos de la intensidad de luz emitida desde un punto  $x_p$  fijo. Este parámetro  $r$  fué determinado en trabajos anteriores mediante la experimentación, forzando al comportamiento experimental para obtener estos parámetros y utilizarlos en estos cálculos. Sin embargo, estos parámetros posteriormente serán objeto de estudio mediante un análisis numérico para optimizar esta ecuación, y así obtener estos parámetros de manera analítica, ya que esto ayudará a realizar un mejor análisis de manera analítica de las uniones p-n para el mejoramiento de las mismas.

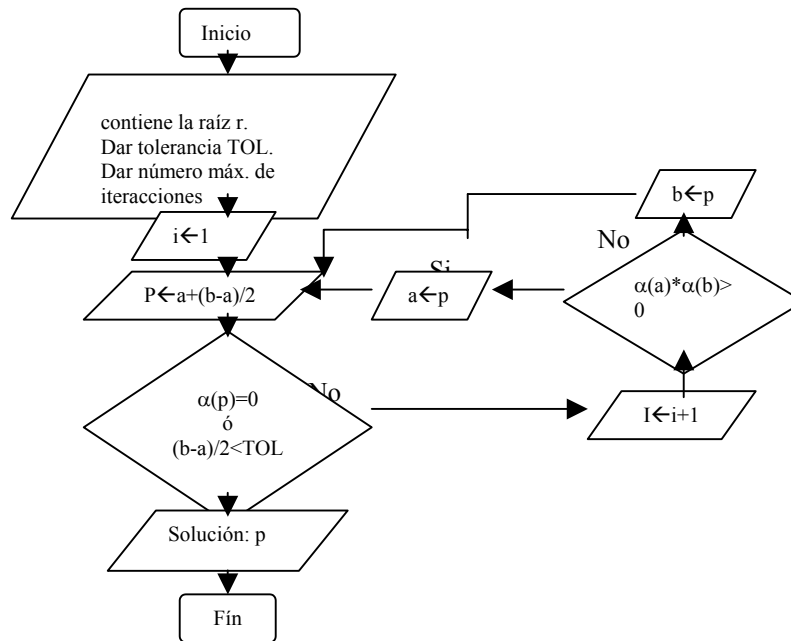


Figura 3. Diagrama de flujo para encontrar la solución  $r$  en la ecuación  $\alpha(r)$  de la absorción óptica.

El segundo proceso que realiza el programa, es el de hallar una solución para la ecuación anterior. Para ello, se utiliza un método numérico conocido para encontrar aproximaciones numéricas de raíces de ecuaciones. Esto implica encontrar una raíz  $r$  de una ecuación de la forma  $\alpha(x)=0$ , para la función  $\alpha(r)$ , (El número  $r$  se llama también cero de  $\alpha$ ). Este método se llama “Método de bisección” (figura 4) y supone que  $\alpha$  es una función continua definida en el intervalo dado  $[a,b]$ , que  $\alpha(a)$  y  $\alpha(b)$  tienen signos opuestos, y basándose en un teorema del cálculo llamado Teorema del valor medio. Existe un número  $r$  en dicho intervalo, tal que  $\alpha(r)=0$ . Aunque el procedimiento funciona bien para el caso cuando  $\alpha(a)$  y  $\alpha(b)$  tienen signos opuestos y existe más de una raíz en el intervalo  $(a,b)$ , se considera por simplicidad que es única la raíz en ese intervalo. El método consiste en dividir la mitad rápidamente los subintervalos de  $[a,b]$  y en cada paso, localizar la mitad que contiene  $r$ .

Existen varios métodos para hallar raíces de ecuaciones, más complejos y más exactos, sin embargo, por la naturaleza de nuestra ecuación no es necesario implementar otro método, ya que el método de bisección aproxima raíces cuyas ecuaciones tienen un comportamiento casi lineal y la nuestra tiene este comportamiento.

La implementación en MATLAB de estos dos procesos no fue muy difícil, ya que el código y sintaxis que maneja este lenguaje es similar al del lenguaje C, que básicamente es un lenguaje estándar en diversas aplicaciones.

### 3 Resultados

La ejecución de los dos programa desarrollados en MATLAB, da lugar a la generación de varias gráficas que muestran el comportamiento de la intensidad de luz alrededor de un punto emisor, y de la gemisión de capas en una superficie. El análisis hasta este punto consiste en observar el comportamiento de estas curvas generadas, variando algunas constantes que anteriormente se han descrito, principalmente nuestro parámetro ya conocido  $\alpha r$ , y el punto emisor de luz  $x_p$ .

Este análisis de gráficas se ha llevado a cabo para complementar los resultados experimentales llevados a cabo hace algún tiempo, sin embargo, en este trabajo sólo se muestran tres gráficas obtenidas para mostrar los tres tipos de resultados encontrados y que son los que generalizan al fenómeno estudiado en este trabajo, y se observan en las figuras 4, 5 y 6.

En la primera figura podemos observar el campo de radiación que se genera alrededor de un punto emisor situado en un medio de absorción homogéneo. Aquí podemos observar, que las curvas generadas son constantes y se sitúan a una misma distancia del punto emisor de luz. Esto nos indica que aquí la absorción es constante. Se utilizan los siguientes parámetros para la modelación dentro del medio homogéneo:  $A=5.1 \times 10^{-1} \mu m$ ,  $B=5.0 \times 10^{-1} \mu m$ ,  $a=2.1 \times 10^{-1} \mu m$ .  $\alpha r=(1)0.1$  ; (2)0.5 ; (3)1 ; (4)3 ; (5)5.

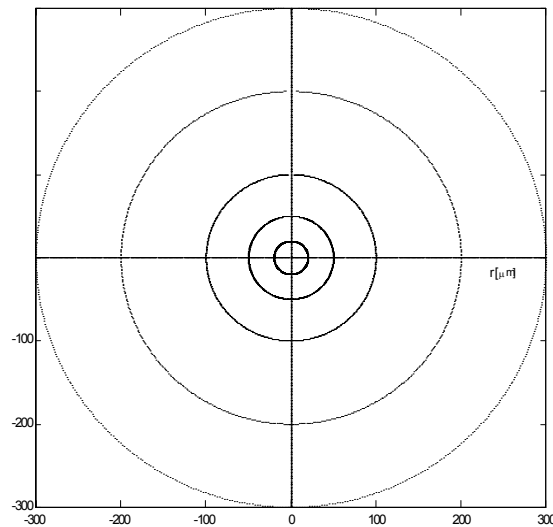


Figura 4. Campo de radiación alrededor de un punto emisor situado en un medio con absorción homogénea dentro de la región  $n$ .

En la siguiente gráfica el punto emisor de luz está alejado de la unión p-n, esto provoca que las curvas se comporten de manera casi constante pero cuando se acercan a la unión su comportamiento deja ya de ser constante. Los siguientes parámetros se utilizan para la modelación alrededor del punto  $x_p=0 \mu m$ :

$A=5.1 \times 10^{-1} \mu m$ ,  $B=5.0 \times 10^{-1} \mu m$ ,  $a=2.0 \times 10^{-1} \mu m$ .  $\alpha r=(1)0.2$ ; (2)0.5; (3)1; (4)2; (5)3.

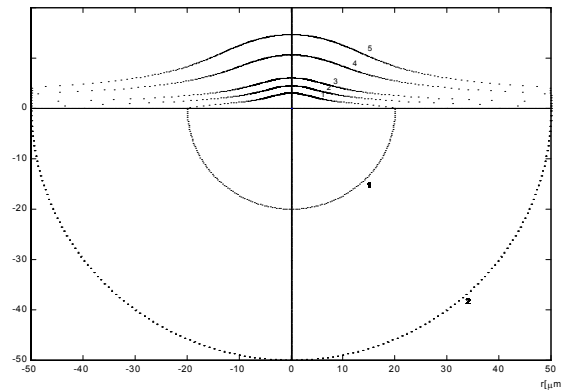


Figura 5. Campo de radiación alrededor de un punto emisor en  $x_p=0 \mu m$ , en donde la absorción óptica tiene absorción inhomogénea.

En la siguiente gráfica, tenemos al punto emisor de luz cerca de la unión p-n,  $x=5 \mu m$ . Se observa que las curvas describen un comportamiento no constante como el anterior caso, ya que la intensidad de luz disminuye en la región p en donde la luz se emite en un medio no homogéneo. Los valores de la ecuación en este caso son los siguientes:  $A=5.1 \times 10^{-1} \mu m$ ,  $B=5.0 \times 10^{-1} \mu m$ ,  $a=2.0 \times 10^{-1} \mu m$ .  $\alpha r=(1)0.2$ ; (2)0.5; (3)1; (4)2; (5)3.

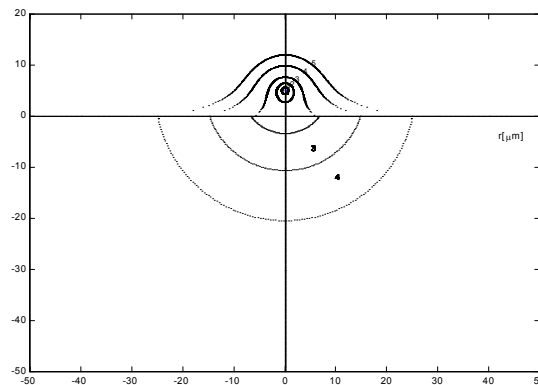


Figura 6. Campo de radiación alrededor de un punto emisor en  $x_p=5 \mu m$ .



## 4 Conclusiones

Como era de esperar, una fuente puntual emisora situada en un medio homogéneo de constante absorción óptica, genera superficies de intensidad constante a formas esféricas concéntricas (fig. 4).

La situación cambia drásticamente al situar al emisor en una región de alta e inhomogénea absorción óptica, situación que se muestra en la figura 5. Las superficies de intensidad constante se colocan a distancias  $r$  considerablemente menores que en el anterior caso. Con creciente distancia desde el origen se notan valores  $r$  mayores en la dirección a donde se reduce la absorción óptica. Al involucrar la región  $n$  con absorción óptica constante sigue propagándose una superficie circular con el punto de emisión como centro. En la figura 7 el emisor se encuentra cerca de la unión de las dos regiones. La absorción óptica crece en forma considerable hacia valores positivos de  $x_p$ , como se nota en la figura 1. Por lo tanto, resulta una concentración a corta distancia de las superficies de constante intensidad, mientras hacia la región  $n$  de baja absorción nuevamente se forman superficies circulares con el emisor en el foco.

Es de concluir, que al tocar la superficie de una unión  $p-n$ , el campo cercano depende sensiblemente de la función de absorción óptica dentro y alrededor de la región donde se genera la luz.

## Referencias.

- [1] Burden-Faires, Análisis Numérico, Grupo Editorial Iberoamericano 1996.
- [2] A. Zehe, Annalen der Physik, 7. Folge, Band 29, Heft 1, pp 331-339 (1973)
- [3] A. Zehe, Microelectrónica, Editorial BUAP, Puebla 1999.