

Circuitos ópticos integrados y guía de ondas

J. E. Alfonso^{1,*}

¹ Grupo de Física de la Materia Condensada

Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia

Resumen

En el presente trabajo se dan a conocer los conceptos básicos del funcionamiento de un circuito óptico integrado (COI), haciendo especial referencia sobre la fibra óptica y la guía de ondas. De la fibra óptica se destacan sus propiedades y ventajas cuando se usa en comunicaciones y como conectores de COI. En cuanto a la guía de ondas, se hace la discusión del formalismo matemático utilizado para estudiar el confinamiento de modos ópticos en guía de ondas planas de tres capas. Finalmente, se discute una de las técnicas empleadas para fabricar guía de ondas en forma de película delgada.

Palabras claves: Circuito óptico integrado, guía de ondas, fibra óptica

Abstract

In this work, the basic concepts of the function of the optical circuit integrated is present, the main topics are the optic fiber and waveguide. The fundamental properties and profits of the optical fiber are outstanding. On the topic about waveguide was development the mathematical formalism used for study the confined of optics modes on planar waveguide of three layers. Finally, the techniques used for make waveguide by method of thin films were discussed.

1. Introducción

La transmisión y procesamiento de señales conducidas por rayos de luz, en lugar de utilizar corrientes eléctricas, ondas de radio o radiofrecuencia, son temas de gran interés a partir de la década de los 60 debido al avance simultáneo de varias tecnologías que permitieron contar con equipos láser y fibras ópticas, elementos básicos en la propagación guiada de la información. La aparición de la fibra óptica [1] y la mejora de su atenuación óptica hasta niveles limitados por la dispersión Rayleigh de las inhomogeneidades de los materiales con que se fabrican, permitieron el confinamiento de la luz en cables flexibles similares a los usados en distribución de señales eléctricas. Típicamente, las

*· jealfonsoo@unal.edu.co

fibras ópticas actuales funcionan en las ventanas de 1.3 y 1.5 μm y presentan atenuaciones de 1 dB/km. Además, el avance experimentado en el desarrollo de fuentes láser contribuyó al desarrollo de las comunicaciones ópticas. Por un lado, muchos sistemas de comunicaciones locales utilizan fotodiodos y los sistemas que requieren grandes distancias de propagación utilizan láseres, mayormente láseres de semiconductor, por su capacidad de producir emisiones monomodo que se acoplan bien a las fibras ópticas.

El proceso de señales ópticas requiere componentes ópticos tales como prismas, lentes, espejos, moduladores electroópticos y detectores. Todos estos elementos pueden ser instalados en una mesa antivibracional y llegan a tener dimensiones de unos cuantos metros cuadrados, lo cual es relativamente fácil de instalar en un laboratorio a nivel experimental, pero no es de mucha utilidad en aplicaciones prácticas. Estos inconvenientes hicieron que en los años 60 se desarrollara el concepto de lo que hoy en día se conoce como óptica integrada, en la cual los alambres y antenas de radio se reemplazan por ondas guiadas de luz por fibra óptica, y los convencionales circuitos integrados eléctricos son reemplazados por miniaturizados Circuitos de Óptica Integrada (COI) [2]

El objetivo de este trabajo es dar a conocer el funcionamiento básico de un COI, presentar las ventajas de las guías de onda frente a otros sistemas de transmisión de señales y tratar los modelos físicos y la descripción matemática de las llamadas guías de onda plana, y finalmente discutir sobre la fabricación de guía de ondas mediante diferentes técnicas.

2. Ventajas de la óptica integrada

Para dar una idea de las ventajas que tienen los sistemas COI comparados con sus contrapartes, los circuitos eléctricos, la figura 1 muestra un hipotético sistema de fibra óptica con un COI para comunicaciones ópticas que se usará para ilustrar algunas de las ventajas especiales de la óptica integrada. En este sistema, el transmisor y el receptor están cada uno contenido en un elemento de COI, y los dos son interconectados por medio de fibra óptica que funciona como guía de ondas. Las fuentes de luz son diodos láser integrados que emiten en las longitudes de onda λ_1 y λ_2 . Por simplicidad, se muestran solo dos diodos, pero probablemente se podrán usar cientos de ellos en sistemas prácticos. Debido a que la luz emitida por cada láser es de diferente longitud de onda estas viajan por ondas portadoras esencialmente independientes dentro de la guía de ondas, así que algunas señales pueden ser transmitidas simultáneamente, o "multiplexadas" dentro de la fibra óptica. En el receptor, estas pueden ser separadas por filtros selectivos de longitud de onda y conducidas a diferentes detectores. Adi-

cionalmente, diodos láser deberán ser usados en el receptor como osciladores locales para detección de señales ópticas de diferente frecuencia [2].

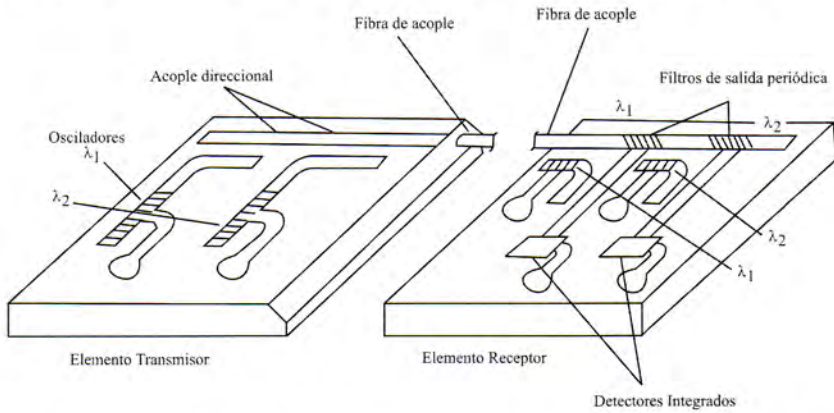


Figura 1. Sistema Óptico Integrado monolítico, en el que se destacan: acople direccional, receptor de longitud de onda λ_1 receptor de λ_2 , filtros de salida periódica, fibras de acople y detectores integrados.

Hace algunos años, solo se conocían los conectores eléctricos, los circuitos integrados y las antenas de radio, ahora han hecho su aparición en el ámbito de las comunicaciones las guías de onda de fibra óptica que es un elemento fundamental dentro de la arquitectura de los COI y por lo tanto merece ser analicen las propiedades que las hacen más eficientes que sus contrapartes. Las ventajas de las fibras ópticas se pueden resumir en: ser inmunes frente a la interferencia electromagnética, estar exentas de cortos circuitos, seguridad en la recepción de la señal, bajas pérdidas en la transmisión y una banda ancha en el espectro electromagnético. Como su mayor desventaja se puede anotar que no pueden ser usadas en transmisiones donde se genere alta potencia eléctrica.

La primera ventaja se hace manifiesta en sistemas electrónicos modernos, tales como los que se encuentran en traspordadores espaciales donde existen haces de alambres que son llevados a grandes distancias, estos alambres pueden actuar como antenas receptoras, generándose señales producidas por inducción del campo electromagnético que rodea el alambre, estas señales interfieren deformando la señal de información, lo cual es altamente indeseable en radares y telecomunicaciones multicanal. Si bien se puede impedir la formación de estas señales con cables coaxiales, los recubrimientos pueden generar capacitancias parásitas que limitan la frecuencia de respuesta o el ancho de banda. Las guías de ondas de fibra óptica tienen inmunidad a este tipo de interferencia debido a que no tienen alambres metálicos y por lo tanto no existirán corrientes que puedan producir acoplamientos electromagnéticos.

Por otra parte, a diferencia de los alambres metálicos las fibras ópticas no conducen flujo de corriente eléctrica, por lo tanto los cortocircuitos están excluidos en estos dispositivos. Las interconexiones con fibra óptica son particularmente útiles en aplicaciones de alto voltaje, tales como transmisión de datos de telemetría y en control de señales a líneas de potencia de transmisión y en conmutación. En este caso las propiedades de la fibra óptica eliminan la necesidad de los transformadores de aislamiento.

Sin la menor duda, que la ventaja más importante de las fibras ópticas esta en el hecho de poder hacer transmisiones de señales ópticas de 2 Gigabits/s en distancias que cubren algunos kilómetros, con pequeñas pérdidas, estas pueden ser reducidas a menos de 5 dB/km. A nivel de laboratorio, han sido desarrolladas fibras con atenuación menores de 1 dB/km [2] Las pérdidas en las fibras son relativamente independientes de la frecuencia, mientras que en los interconectores que les hacen competencia estas tienen un rápido aumento con la frecuencia. En las fibras ópticas, la máxima frecuencia en las que se pueden usar para transmisión está limitada por la dispersión de la luz con las paredes de la fibra.

Las fibras ópticas de las que se dispone hoy en día son multimodo, en este tipo de fibra las ondas de luz se propagan simultáneamente en diferentes modos ópticos. Debido a que cada modo tiene diferente velocidad de grupo, un pulso de luz que viaje a lo largo de la fibra es ensanchado. La transformación del dominio del tiempo del pulso ensanchado, al dominio de la frecuencia resulta en un correspondiente producto del ancho de banda de alrededor de 200 MHz km. Esta dispersión modal puede evitarse usando fibras monomodales, en las que el diámetro del recubrimiento se hace suficientemente pequeño (10 nm para el visible o para el infrarrojo cercano) para cortar la propagación de los modos mas altos. En este caso, el ancho de banda solamente es limitado por la dispersión del material, o la variación del índice de refracción del recubrimiento con la longitud de onda, anchos de banda mayores a 3 GHz km han sido logrados [3]

En la mayoría de aplicaciones, el gran ancho de banda de las fibras ópticas es usado para transmitir no una sola señal con ese ancho de banda, sino una multiplicidad de señales con pequeños anchos de banda dentro de la misma onda portadora de luz. Esta capacidad de multiplicidad, combinada con el hecho de que el diámetro de la fibra es cientos de veces más pequeño que el de un cable coaxial, significa que el número de canales de información por sección de área transversal es 10^4 veces mayor cuando se usa una fibra óptica. Esta es una importante consideración cuando hay limitación de espacio como en tarjetas de cualquier sistema de control.

Aparte de las ventajas anteriormente citadas sobre las fibras ópticas, es preciso decir que el uso de estas puede significar una reducción considerable en los costos, debido a que los materiales básicos con los que las fibras son fabricadas son vidrios y plásticos que son mucho más abundantes y baratos que el cobre, que era material base en la construcción de equipos de transmisión y procesamiento de información. Un aspecto que se debe mencionar es que, si bien, las fibras ópticas pueden transmitir señales con anchos de banda del orden de los gigahertz, hasta ahora no se tiene la capacidad de generar y transmitir ese tipo de señales, todo esto debido a que los circuitos eléctricos integrados están conectados a través de alambres e interconexiones metálicas, que tienen su límite de respuesta a la frecuencia en un GHz, esto ha hecho pensar en circuitos ópticos integrados en los que la información es transportada por rayos de luz.

Por otra parte, los circuitos ópticos integrados tienen varias ventajas cuando se les compara con los circuitos eléctricos integrados o los convencionales sistemas de procesamiento de señales ópticas compuestos de un gran número de elementos discretos. Las mayores ventajas del COI son el incremento del ancho de banda, expansión de la frecuencia, bajas pérdidas en los acoples y baja potencia en el consumo. Es posible conducir cientos de señales dentro de un canal de guía de ondas usando los divisores de longitud de onda, como el que se muestra en la figura 1. Esta técnica ha sido usada por algunos grupos de trabajo [3] para re-direccionar las señales de seis láseres dentro de una guía de ondas. El acoplamiento de señales dentro de una guía óptica ha mostrado tener eficiencias hasta de un 100 %.

3. Modos en una guía de onda de estructura plana

Como se ve en la figura 2, una guía de ondas planas está limitada por dos planos paralelos con respecto a una dirección (x), pero tiene una extensión infinita en las direcciones laterales (y, z). Si bien, debido a que tiene dos dimensiones infinitas, no podría ser una guía de ondas práctica para circuitos ópticos integrados, pero es un modelo utilizado por muchos autores que ha sido útil para los propósitos de describir la guía de ondas rectangular [3, 4].

3.1. Descripción teórica de los modos de una guía de ondas planas de tres capas.

Considerando la guía de ondas planas que se muestra en la figura 2. En la que se asume que las capas tienen dimensión infinita en las direcciones y y z , y las capas 1 y 3 se tomaran con dimensión semi-infinita en la dirección

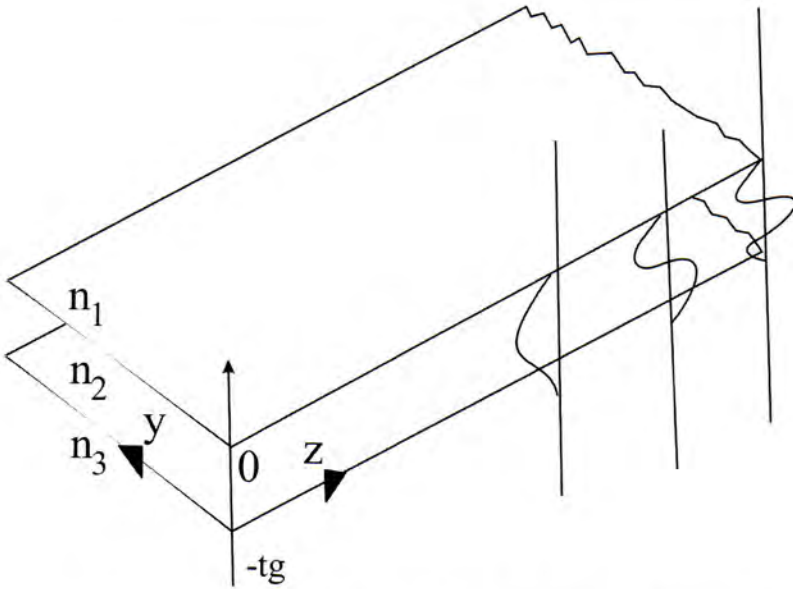


Figura 2. Estructura básica de una guía de onda plana de tres capas. En la figura se muestra la dirección de propagación, los tres índices de refracción y el espesor de la guía de onda t_g .

x , las ondas de luz se propagan lo largo de la dirección z . Tomando como punto de partida que un modo es una distribución espacial de energía en una o mas dimensiones, lo que matemáticamente equivale a decir que un modo es un campo electromagnético que es una solución de las ecuaciones de Maxwell, la ecuación de onda que describe la propagación de la onda para esta dada por

$$E(r, t) = \left[\frac{n^2(r)}{c^2} \right] \frac{\partial^2 E(r, t)}{\partial t^2}, \quad (1)$$

donde E es el vector campo eléctrico, r es el radio vector, $n(r)$ es el índice refracción, k el vector de onda y c es la velocidad de la luz en el vacío. Para ondas monocromáticas, la solución de la ecuación (1) es

$$E(r, t) = E(r) e^{i\omega t}, \quad (2)$$

donde ω es la frecuencia. Substituyendo la ecuación (2) en la (1) se obtiene

$$\nabla^2 E(r) + k^2 n^2(r) E(r) = 0, \quad (3)$$

donde $k = \omega/c$. Si se asume, por conveniencia, una onda uniformemente plana propagándose en la dirección z , es decir,

$$E(r, t) = E(x, y) e^{-i\beta z},$$

siendo β una constante de propagación, con esta aproximación la ecuación (3) se escribe de la forma

$$\frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial y^2} + [k^2 n^2(r) - \beta^2] E(x, y) = 0 \quad (4)$$

Teniendo en cuenta que la guía de ondas es infinita en la dirección y , la ecuación (4) se puede escribir para las tres regiones en la dirección x

$$\begin{aligned} \text{Región } n_1 & \quad \frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial x^2} + (k^2 n_1^2(r) - \beta^2) E(x, y) = 0 \\ \text{Región } n_2 & \quad \frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial x^2} + (k^2 n_2^2(r) - \beta^2) E(x, y) = 0 \\ \text{Región } n_3 & \quad \frac{\partial^2 E(x, y)}{\partial x^2} + (k^2 n_3^2(r) - \beta^2) E(x, y) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Las soluciones de las ecuaciones (5) son funciones sinusoidales o exponenciales de x en cada una de las regiones dependiendo ya sea que $(k^2 n_i^2 - \beta^2)$, $i = 1, 2, 3$, sea mayor o menor que cero. Las condiciones de continuidad exigen que $E(x, y)$ y su primera derivada, con respecto a x , deberán ser continuas en la interfase de las capas. Con lo cual todos los modos están limitados a los que se muestran en la figura 3.

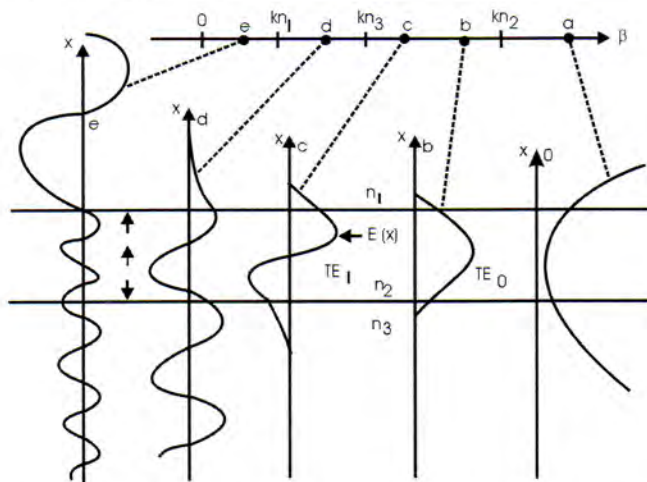


Figura 3. Diagrama de los posibles modos soportados en una guía de ondas planas.

Al examinar como cambian las formas de los modos como una función de β , para el caso de frecuencia constante ω y $n_2 > n_3 > n_1$ Este orden de signos

es un caso muy común, correspondiendo, por ejemplo, a una capa de guía de onda de índice n_2 en un sustrato con índice mas pequeño n_3 rodeado de aire de índice n_1 . Esta condición es básica para obtener una guía de ondas. Cuando $\beta > kn_2$, la función de onda es exponencial en las tres regiones y la forma de los modos es como la que se muestra en la figura 3 las cuales satisfacen las condiciones de continuidad de $E(x)$ y su derivada en la frontera. Este modo no es físicamente posible ya que el campo se incrementa indefinidamente en las capas 1 y 3, lo cual implica energía infinita. Los modos b y c están bien confinados, generalmente se les define como modos transversales eléctricos (TE_0 y TE_1) orden cero y orden uno, respectivamente [2]. Para valores entre kn_2 y kn_3 tales modos pueden ser soportados. Si es mayor que kn_1 pero menor que kn_3 , aparecerá un modo como el mostrado en (d) de la figura 3. Este tipo de modo, que está confinado en la interfase del aire pero varía sinusoidalmente en el sustrato, se denomina modo de radiación del sustrato. Puede ser soportado por la estructura de la guía de onda, pero debido a su continua pérdida de energía en la propagación desde la guía de ondas al sustrato tiende a amortiguarse a cortas distancias. De aquí que no sea muy útil en la transmisión de señales, pero sirve para hacer acople de señales. Si β es mucho menor que kn_1 , la solución para $E(x)$ es sinusoidal para las tres regiones de la estructura de la guía. Estos no son modos guiados debido a que la energía es libre de esparcirse fuera de la guía.

En el modelo de la estructura de una guía de ondas planas, en donde las capas que confinan la luz tienen índices de refracción n_1 y n_3 , se asume que se extienden hasta infinito en los sentidos de los ejes y y z . Esta suposición implica que no hay reflexiones en esas direcciones, excepto las que ocurran en las interfaces entre n_1-n_2 y n_2-n_3 . Para el caso de ondas planas TE viajando en dirección z , las ecuaciones (5) tienen soluciones de la forma

$$\begin{aligned} E_y(x) &= A e^{-qx} & 0 \leq x \leq \infty \\ E_y(x) &= B \cos(hx) + C \operatorname{sen}(hx) & -t_g \leq x \leq 0 \\ E_y(x) &= D e^{p(x+t_g)} & -\infty \leq x \leq -t_g, \end{aligned} \quad (6)$$

siendo t_g el espesor de la guía y A, B, C, D, h, q y p son todas constantes que son ajustadas por las condiciones de frontera, que requieren la continuidad de E_y y $H_z = \frac{i}{\omega\mu} \frac{\partial E_y}{\partial x}$. Dado que la permeabilidad μ y la frecuencia se asumen como constantes, se debe establecer la segunda condición de frontera que requiere que $\frac{\partial E_y}{\partial x}$ sea continua. Con lo que las constantes A, B, C y D serán determinadas al hacer que E_y y $\frac{\partial E_y}{\partial x}$ sean continuas en la frontera de las regiones 1 y 2 ($x = 0$), y en $x = -t_g$. Este procedimiento conduce a tener tres

ecuaciones con cuatro incógnitas así que la solución para E_y puede ser escrita en términos de una sola incógnita C'

$$\begin{aligned} E_y(x) &= C' e^{-qx} & 0 \leq x \leq \infty \\ E_y(x) &= C' \cos(hx) + C' \frac{q}{h} \operatorname{sen}(hx) & -t_g \leq x \leq 0 \\ E_y(x) &= C' \left[\cos(ht_g) + \frac{q}{h} \operatorname{sen}(ht_g) \right] e^{p(x+t_g)} & -\infty \leq x \leq -t_g \end{aligned} \quad (7)$$

Para determinar q , h y p se substituye (7) en (5), y operando con la ecuación (3) se obtienen

$$\begin{aligned} q &= (\beta^2 - n_1^2 k^2)^{1/2} \\ h &= (n_2^2 k^2 - \beta^2)^{1/2} \\ p &= (\beta^2 - n_3^2 k^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (8)$$

Las anteriores ecuaciones solo tienen como incógnita a β que es la constante de propagación en la dirección z . Tomando las condiciones de continuidad arriba anotadas, sobre el campo eléctrico y su primera derivada, se obtiene

$$\tan(ht_g) = \frac{p + q}{h \left(1 - \frac{pq}{h^2}\right)} \quad (9)$$

La ecuación trascendental (9) junto con la ecuación (8) se solucionan gráficamente, pintando el lado derecho e izquierdo en función de β para determinar los puntos de intersección, con lo que se obtienen un conjunto de valores discretos de βk , correspondientes a los modos permitidos. Una vez determinado βk_m , es claro que se podrán hallar los valores de q_m , p_m y h_m mediante las ecuaciones (8). La única variable desconocida en las ecuaciones (8) es C' , en este caso, es conveniente normalizar de tal manera que $E_y(x)$ represente un flujo de potencia de un vatio por unidad de longitud en la dirección y . Así un modo en el que $E_y(x) = A E_y(x)$ tendrá un flujo de potencia de A^2 Vatios/m. En este caso la condición de normalización es

$$\frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} E_y H_x^* dx = \frac{\beta_m}{2\omega\mu} \int_{-\infty}^{\infty} [\xi_y^m(x)]^2 dx = 1 \quad (10)$$

Substituyendo la ecuación (7) en la ecuación (10) se obtiene

$$C_m = 2h_m \sqrt{\frac{\omega\mu}{|\beta|_m (t_g + 1/q_m + 1/p_m) (h_m^2 + q_m^2)}} \quad (11)$$

Mientras tanto, para modos ortogonales se tiene

$$\int_{-\infty}^{\infty} \xi_y^{(m)} \xi_y^{(l)} dx = \frac{2\omega\mu}{\beta_m} \delta_{lm} \quad (12)$$

Para el caso de modos TM, los desarrollos son muy similares excepto que las componentes diferentes de cero son H_y , E_x y E_z [2]

Un caso especial de la guía de ondas planas por su particular interés, ocurre cuando n_1 es igual a n_3 . Esta guía simétrica es usada frecuentemente en circuitos de óptica integrada, por ejemplo, cuando una capa de índice n_2 está pegada en sus dos superficies con capas idénticas con índice n_1 ligeramente menor. Multicapas de COI de GaAlAs a menudo utilizan este tipo de guía de ondas, las ecuaciones desarrolladas en la anterior sección son aplicables a esta estructura de guía, pero se pueden hacer simplificaciones que permiten conocer que modos son soportados por la guía, lo único que se necesita conocer es cuales modos en particular son posibles de acoplar en la guía de onda. Una manera de dar respuesta a esta pregunta es utilizando las ecuaciones (5) teniendo en cuenta que en el punto de corte (el punto en el que el campo empieza a oscilar entre las regiones uno y tres), la magnitud de β está dada por

$$\beta = kn_1 = kn_3 \quad (13)$$

Al desarrollar la matemática expuesta anteriormente, se obtiene la condición que determina que modos pueden ser soportados para un n dado y una relación de λ_0/t_g . La expresión que permite calcular estos modos queda expresada como

$$\Delta n \quad (n_2 - n_1) > \frac{m_s^2 \lambda_0^2}{4t_g^2 (n_2 + n_1)}, \quad m_s = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (14)$$

donde $\bar{k}\omega/c = 2\pi/\lambda_0$ ha sido usado. Es interesante notar que el modo de menor orden ($m_s = 0$) en la guía simétrica no es permitido. En Principio, cualquier longitud de onda puede ser guiada en este modo aún con un pequeño incremento de n . Sin embargo, para pequeños n y/o λ_0/t_g el confinamiento es pobre, con colas del modo evanescente extendiéndose dentro del sustrato.

4. Técnicas de fabricación de guías de onda

La formación de una guía requiere introducir una modificación del índice de refracción entre la guía de ondas y el medio que lo rodea. Básicamente existen

dos métodos para obtener esta condición. Modificando la superficie de un sustrato y mediante el depósito de una película delgada sobre un sustrato. Con este propósito se han utilizado diferentes técnicas que han sido desarrolladas para producir la diferencia requerida. Entre las más usadas están la pulverización catódica (Sputtering) [4], difusión de impurezas [5, 6], implantación iónica [7] e intercambio iónico [8] y mediante depósito de película delgada por pulsos láser (PLD). La selección de una técnica determinada depende de la aplicación deseada y de las facilidades disponibles. En lo que sigue se discutirá la técnica de fabricación de guía de ondas por la técnica PLD.

4.1. Guía de ondas fabricadas con la técnica PLD.

A pesar de que los primeros experimentos de ablación de materiales con láser fueron realizados hacia el año 1967 [9], la técnica PLD empieza a despegar y tiene su pleno desarrollo en los años 1990, fecha después de la cual empiezan a conocerse publicaciones de evaporación de materiales de interés optoelectrónico [10] y en fechas más recientes han aparecido artículos que dan cuenta de la fabricación de dispositivos tales como filtros de ondas acústicas en superficie y guía de ondas [11]

En particular, la técnica PLD ha mostrado ser eficiente en la fabricación de guía de ondas a partir de óxidos conocidos como Sillenitas tales como el $\text{Bi}_{12}(\text{Ga}_x\text{Bi}_{1-x})\text{O}_{19,5}$ ($x = 0,4 \quad 0,5$) y $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ [12] Estos óxidos fueron depositados sobre Zirconio estabilizado, usando un láser excímero de KrF con una longitud de onda de 248 nm.

La capacidad de las láminas como guía de ondas se determina a través de la técnica de acople óptico con prisma. Esta técnica permite observar modos guiados en la película. Los modos confinados dentro del material pueden ser visualizados a través de lo que se conoce como modos oscuros [13] La técnica de los modos oscuros consiste en determinar el índice de refracción efectivo (N_m) de los modos observados al acoplar con un prisma, con alto índice de refracción (rutilo), luz de diferente longitud de onda dentro de la película.

5. Conclusión

En el desarrollo del trabajo se han dado a conocer las ventajas y desventajas de los dispositivos optoelectrónicos frente a los métodos tradicionales en transmisión de señales de comunicación. Se desarrolló el formalismo matemático que permite entender cuales son las condiciones físicas para que un material pueda guiar luz y se trabajó un caso particular de guía de ondas, la guía de

ondas simétrica y además se presentó la fabricación de guía de ondas en forma de película delgada crecidas mediante la técnica PLD.

Es importante anotar que en el Departamento de Física de la Universidad Nacional de Colombia se cuenta con técnicas como la de pulverización catódica y evaporación con láser, que permiten depositar cualquier tipo de material en forma de película delgada sobre diferentes sustratos y de esta manera fabricar guía de ondas, siendo además posible realizar el estudio de los modos guiados mediante la técnica de modos oscuros.

Referencias

- [1] K. C. Kao *Proc. IEEE* **113** 1151 (1966)
- [2] G Robert Hunsperger *Integrated Optics. Theory and Technology*, Spring Verlag (1984)
- [3] S. E. Miller *Proc. IEEE* **68** 1173 (1980)
- [4] H. F. Taylor y A. Yariv *Proc. IEEE* **62** 1044 (1974)
- [5] H. Kogelnik *Theory of dielectric waveguides in integratic Optics* 2nd. Ed. By T Tamir
- [6] R. V Schmidt y I. P Kaminow *Appl. Phys. Lett.* **25** 455 (1974)
- [7] P J Chandler, S. J Field, D. C. Hanna, D. P Shepherd y L. Zhang *Electr. Lett.* **25** 985 (1989)
- [8] W K. Burns, P H. Klein, J West y L. E. Plew *J. Appl. Phys.* **50** 6175 (1979)
- [9] J M. Cabrera, J Olivares, M. Carrascosa, J Rams, R. Müller y E. Dieguez *Advanced in Physics* **45** 349 (1996)
- [10] Y. Shibata et. al. *Mat. Res. Soc. Proc.* **285** 361-366 (1993)
- [11] J E. Alfonso, M. J Martín, J Mendiola, K. Polgar y C. Zaldo *Appl. Sci.* 96-98 (1996)
- [12] J E Alfonso, M. J Martín, J Mendiola, A. Ruiz y C. Zaldo *J. Appl. Phys.* **79** 8210 (1996)
- [13] P K. Tien, R. Ulrich y R. J Martín *Appl. Phys. Lett.* **14** 291 (1969)