

Fabricación de guías de onda ópticas en silicio utilizando óxido de silicio y nitruro de silicio

Rosa Chávez Velázquez, Ignacio Zaldívar Huerta, Claudia Reyes Betanzo y Alejandro Díaz Sánchez
Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), Depto. de Electrónica.

Apartado Postal 51 y 216, Puebla, 72000, México

(Recibido: 30 de septiembre de 2005; Aceptado: 26 de octubre de 2005)

Se diseñaron y fabricaron guías de onda ópticas planares de índice abrupto utilizando películas de óxido de silicio (SiO_2) y nitruro de silicio (Si_3N_4) obtenidas por técnica PECVD. Debido a las características ópticas, mecánicas y eléctricas, se eligió el silicio como material de sustrato. Pruebas de transmitancia de luz a una longitud de onda de 650 nm fueron realizadas con éxito. La fabricación de guías ópticas es completamente compatible con el proceso CMOS, por lo que se abre la posibilidad de realizar la integración de componentes ópticos y electrónicos en un mismo sustrato de silicio.

Palabras clave: Óptica integrada; Guías ópticas integradas; PECVD; Comunicaciones ópticas

Abstract - Planar optical waveguides of abrupt index refraction, using oxide silicon (SiO_2) and silicon nitride (Si_3N_4) films obtained by means of PECVD technique were designed and realized. Optical, mechanicals and electric characteristics were considered to selected silicon as substrate material. Testing of transmittance for a wavelength of 650 nm was successfully realized. The proposed optical waveguides are fully compatible with the CMOS fabrication process of the INAOE's laboratory. Obtained results allows the integration of optical and electronics devices in a shared silicon substrate.

Keywords: Integrated optics; Integrated optical waveguides; PECVD; Optical communications

1. Introducción

La óptica integrada se inició como línea de investigación aplicada a finales de los años 60, y su objetivo ha sido la miniaturización de dispositivos ópticos de manera análoga a los circuitos integrados en la microelectrónica [1, 2]. Actualmente, la meta consiste en poder integrar dispositivos ópticos y electrónicos en un mismo sustrato, obteniendo de esta manera los circuitos integrados opto-electrónicos OEIC's (Opto-Electronic Integrated Circuits) o de óptica integrada. En este sentido, y gracias a sus características ópticas, mecánicas y eléctricas, el silicio ha sido elegido como material de sustrato, permitiendo con esto la fabricación de moduladores electro-ópticos, interruptores, foto-detectores CMOS, sistemas micro-opto-electro-mecánicos (MOEMs), e incluso la generación de radiación láser como recientemente se ha demostrado [3]. De modo análogo a las fibras ópticas, la óptica integrada se basa en el hecho de que las ondas de luz pueden ser confinadas y guiadas utilizando películas delgadas de material transparente [4]. De esta forma, la luz permite

establecer enlaces entre los diversos componentes que conforman el dispositivo óptico integrado. La figura 1 muestra una guía óptica de Si_3N_4 que permite confinar y dirigir la luz a un fotodiodo integrado en silicio. La motivación para la realización de este proyecto se debió principalmente a: i) contar con un laboratorio de microelectrónica cuyo proceso CMOS es compatible con los materiales utilizados, y ii) establecer una aplicación potencial para que las guías ópticas puedan ser combinadas con circuitos electrónicos fabricados en silicio. Este trabajo esta organizado de la siguiente manera, en la sección dos se muestra el principio de operación de una guía de onda óptica, posteriormente la sección tres describe el diseño y proceso de fabricación utilizado, la sección cuatro presenta los resultados experimentales y finalmente en la sección cinco se presentan las conclusiones y trabajo futuro.

2. Principio de operación

El principio básico de operación de una guía de onda óptica o guía de onda dieléctrica, se fundamenta en la

Tabla 1. Índices de refracción de los dieléctricos [5].

| Material | Índice de refracción | Banda de energía (eV) |
|-------------------------|----------------------|-----------------------|
| Si | 3.42 | 1.12 |
| SiO_2 | 1.48 | 9 |
| Si_3N_4 | 1.97 | 4-5 |

Tabla 2. Características de los dieléctricos

| Material | Índice de refracción | Grueso (nm) |
|-------------------------|----------------------|-------------|
| SiO_2 | 1.4 | 300 |
| Si_3N_4 | 1.9 | 600 |

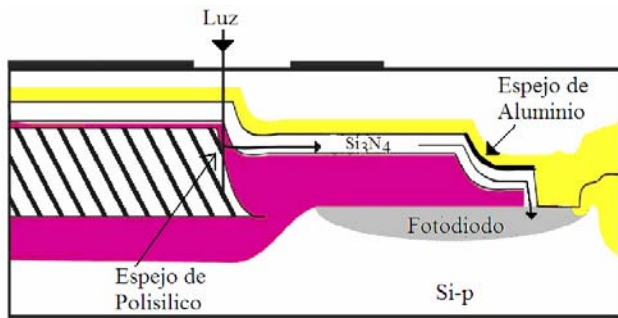


Figura 1. Corte transversal de una guía óptica [1].

reflexión total interna de un rayo de luz en la interfase de dos películas dieléctricas con diferentes índices de refracción. La figura 2 muestra una guía de onda, donde una película dieléctrica de índice de refracción n_f , se encuentra insertada entre el sustrato y otra película, cuyos índices de refracción son n_s y n_c , respectivamente. La condición a satisfacer es que $n_f > n_s > n_c$. Típicamente, el grueso de la guía de onda es de $1 \mu\text{m}$ y la diferencia de índices entre núcleo y recubrimiento es del orden de 10^{-3} a 10^{-1} . Suponiendo que la fuente óptica es coherente y monocromática, y que la guía de onda es un medio dieléctrico sin pérdidas e isotrópico, la reflexión total interna ocurre cuando el rayo de luz tiene un ángulo de incidencia Θ_i que posee un valor entre el llamado ángulo crítico Θ_c y 90° . El ángulo crítico está dado por la expresión [2]

$$\Theta_c = \arcsin(n_c / n_f) \quad (1)$$

Los rayos que cumplen esta condición se propagan en la dirección z, a lo largo del plano x-z mediante múltiples reflexiones totales internas representadas por trayectorias en zig-zag en la frontera de los diferentes materiales sin pérdida de potencia. Los rayos que forman ángulos mayores al crítico se refractan provocando pérdidas de

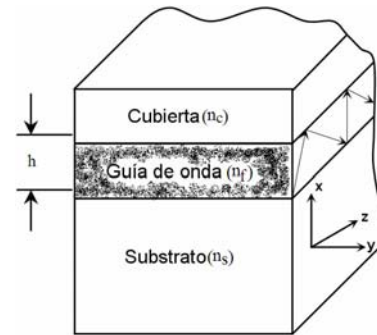


Figura 2. Sección transversal de una guía de onda dieléctrica planar.

potencia óptica y eventualmente se desvanecen. El número de modos soportado por la guía se determina por medio de la expresión [2]

$$M = 2 \frac{h}{\lambda_0} NA \quad (2)$$

Donde $NA = \sqrt{(n_f^2 - n_c^2)}$, es la apertura numérica de la guía de onda y λ_0 es la longitud de onda central de la fuente óptica utilizada. La expresión (2), determina el funcionamiento monomodo o multimodo de la guía de onda en base a las dimensiones físicas de algunas cuantas longitudes de onda, las cuales pueden ser realizadas por medio de técnicas de fabricación utilizadas en microelectrónica.

3. Diseño y Fabricación

El diseño de la guía fue realizado por medio del software Coventor Ware®, el cual es utilizado en el diseño de dispositivos Micro-Electro-Mecánicos (MEMS). Se diseñaron guías ópticas bidimensionales considerando longitudes de 20 y 10 mm con un ancho de 1 mm para ambos casos, como se muestra en la figura 3. Posteriormente, mediante el software L-edit, se diseñaron las mascarillas con las cuales se definen las regiones por medio de técnicas fotolitográficas. Para la fabricación se

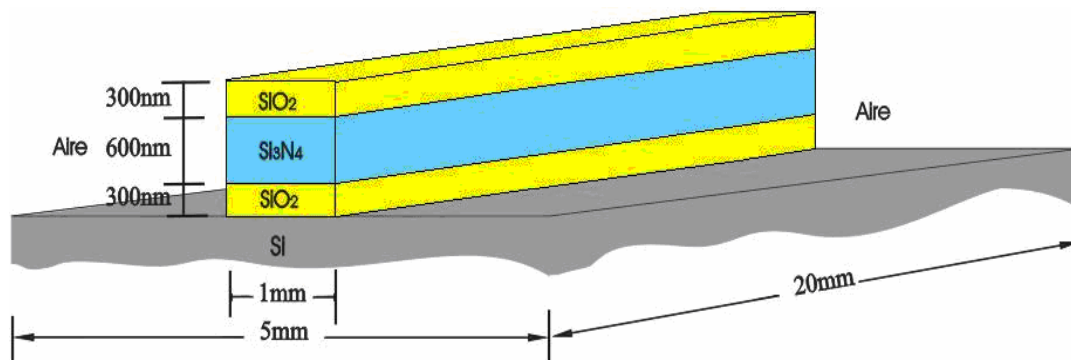


Figura 3. Dimensiones de la guía de onda dieléctrica.

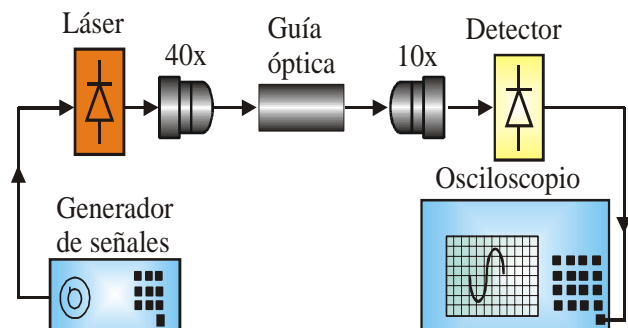


Figura 4. Arreglo experimental para la inyección de luz en la guía óptica

emplearon obleas de silicio tipo n de resistividad $\rho=2-5 \Omega\text{-cm}$, orientación $\langle 100 \rangle$ y grosor de 300 μm . Películas de Si_3N_4 y SiO_2 , obtenidas mediante la técnica de Depósito Químico en Fase Vapor Asistido por Plasma (PECVD, Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition), fueron utilizadas para definir la región de núcleo y recubrimiento, respectivamente. Debido a la alta tensión que presenta el Si_3N_4 , el grueso propuesto fue de 600 nm, mientras que para el SiO_2 fue de 300 nm. La tabla 1 muestra los parámetros considerados para los materiales utilizados en la fabricación. La tabla 2 corresponde a los valores medidos experimentalmente mediante técnicas de elipsometría y perfilometría, para el índice de refracción y grosor de la película, respectivamente. Una vez terminado el proceso de fabricación, se procedió a cortar las muestras para realizar el pulido de las caras de las guías ópticas utilizando abrasivos, esto con la finalidad de eliminar las fracturas y grietas para asegurar una buena inyección de luz en las mismas.

4. Resultados experimentales

En esta sección se muestran los resultados experimentales de transmitancia de luz a través de las guías ópticas fabricadas. La figura 4 muestra de manera esquemática el montaje óptico-mecánico utilizado para tal objetivo. Consta de micro-posicionadores de precisión con movimientos en X, Y, Z, una fuente láser modulable marca COHERENT emitiendo a una longitud de onda de $\lambda=750 \text{ nm}$ y potencia óptica de 50 mW, un fotodetector rápido de silicio tipo PIN marca Thorlabs, modelo DET110, con un rango espectral de 350-1100 nm, objetivos de microscopio, así como un osciloscopio. La fuente óptica fue modulada con una forma de onda cuadrada de 5 Vpp a una frecuencia de 300 Hz, el haz modulado fue focalizado utilizando el objetivo de microscopio (40x) e inyectado a la guía óptica. A la salida de la guía, el haz fue recuperado por medio de otro objetivo de microscopio (10x) y enviado al fotodetector. El osciloscopio permitió visualizar la señal recuperada. La figura 5 muestra la señal transmitida para el caso de la guía óptica de longitud de 10 mm.

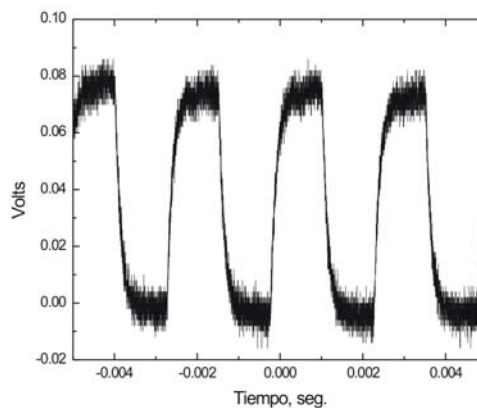


Figura 5. Señal eléctrica desplegada en el osciloscopio

5. Conclusiones

Se presentó el diseño y fabricación de guías de onda dieléctricas. Debido a su alta compatibilidad con el proceso CMOS de circuitos integrados desarrollado en el laboratorio de microelectrónica del INAOE, así como sus características ópticas y eléctricas, se eligió el silicio como material de sustrato y películas de Si_3N_4 y SiO_2 para definir la región del núcleo y recubrimiento de la guía óptica, respectivamente. La transparencia del Si_3N_4 a la longitud de onda utilizada permite aplicaciones potenciales en la primera ventana de las telecomunicaciones ópticas. La técnica de pulido de las caras de las guías debe mejorarse a fin de garantizar una mejor inyección de luz en la guía y disminuir las pérdidas ópticas. Debido a la forma de inyección del haz óptico, las pérdidas por acoplamiento son considerables, sin embargo esto puede ser mejorado si la luz proveniente de la fuente óptica se acopla directamente a fibra óptica, lo cual permitiría un alto grado de confinamiento del haz y por consiguiente disminuir el nivel de pérdidas. Como trabajo futuro se contempla la medición de pérdidas ópticas. Los resultados aquí presentados permiten contemplar a mediano plazo la fabricación de otros dispositivos en el mismo sustrato, abriendo con esto la posibilidad de aplicaciones potenciales en circuitos opto-electrónicos integrados.

Referencias

- [1] R. A. Soref, Silicon-Based Optoelectronics, Proceedings of the IEEE, **81**, 1687 (1993).
- [2] H Zimmermann, Integrated Silicon Optoelectronics, (Springer-Verlag, Germany 2000).
- [3] N. Anscombe, Seeking a Silicon Laser, Photonics Spectra, **62** (2003).
- [4] U. Fisher, T. Zinke, P. Petermann, Integrated Optical Waveguide Switches in SOI, Proceedings of the IEEE, International SOI conference, 141 (1995).
- [5] S. M. Sze, VLSI Technology, (McGraw-Hill, USA, 1983).