

SENSOR DE TEMPERATURA ÓPTICO

Bedolla Ibarra, María Guadalupe (1), Vargas Rodríguez, Everardo (2)

1 [Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [mg.bedollaibarra@ugto.mx]

2 [Departamento de Estudios Multidisciplinarios, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [evr@ugto.mx]

Resumen

Se aprovecharon las propiedades termo-ópticas del silicio y de un material acrílico para implementar un sensor de temperatura. El elemento sensor se fabricó utilizando una oblea de silicio con 5 μm de espesor y una capa delgada de acrílico. En el presente trabajo se presenta una aproximación del modelado espectral de la pila de capas que conforman el elemento sensor. Además, para caracterizar experimentalmente el comportamiento del elemento sensor se midió el espectro de la pila de capas con respecto al cambio de temperatura aplicado. Finalmente se implementó un circuito opto-electrónico básico que nos permitió establecer la relación del cambio de voltaje versus el de temperatura. Los resultados muestran un sensor con alto grado de precisión en un rango de temperatura pequeño.

Abstract

The thermo-optical properties of silicon and acrylic material were used to implement a temperature sensor. The sensing element was fabricated by using a thin layer of acrylic and a 5 μm thick silicon wafer. In the present work an approximation to model the spectral response of the stack of layers that conform the element sensor is presented. Moreover, in order to experimentally characterize the behaviour of the sensing element the stack of layers spectrum with respect to the change of temperature was measured. Finally, a basic opto-electronic circuit was implemented to establish a relationship between the voltage changes versus the temperature. The results show a sensor with a high degree of precision in a small temperature range.

Palabras Clave

Franjas espectrales; propiedades ópticas; sensor; temperatura; silicio;

INTRODUCCIÓN

En la actualidad hay muchas formas de medir la temperatura con todo tipo de sensores de diversas tecnologías. Entre los sensores más comunes empleados para medir temperatura con instrumentación electrónica se tienen: RTDs, termistores, sensores de circuito integrado (IC) y termocuplas, cada uno con sus ventajas y desventajas.

En este trabajo se pretende implementar una forma diferente para medir esta variable, la cual está basada en el silicio (Si) y una capa delgada de un material acrílico. El silicio es un elemento químico de aspecto gris oscuro azulado y pertenece al grupo de los metaloides. La razón de la creciente demanda que tiene el silicio hasta nuestros días no sólo se debe a sus propiedades electrónicas, sino también a sus excelentes propiedades mecánicas, químicas, magnéticas, y ópticas. Tener conocimiento de estas propiedades han permitido al diseñador de circuitos integrados (CI) y dispositivos semiconductores, que a través de técnicas específicas, sea posible desarrollar sensores completamente integrados en silicio [1].

En este trabajo se usaron las propiedades ópticas y térmicas de este material para el desarrollo de un sensor de temperatura. En términos generales al tener una oblea con caras paralelas y pulidas se forma un interferómetro de Fabry-Perot. Los espectros de reflexión y transmisión de estos interferómetros están formados por un patrón de franjas espectrales. En el caso de la oblea de silicio al variar su temperatura, las franjas espectrales se pueden desplazar aprovechando la dependencia del índice de refracción de silicio a la temperatura [2]. Un cambio en la temperatura del silicio induce a un cambio en el índice de refracción n y así mismo se produce un cambio en el espesor geométrico d de la oblea debido al coeficiente de expansión térmica α [3]. Estos cambios a su vez conducen a un cambio de la trayectoria óptica de la luz que pasa a través de la oblea de silicio. Esto hace que se desplacen las franjas espectrales del interferómetro. De igual manera existen materiales acrílicos cuyos coeficientes de expansión térmica y termo-ópticos también pueden ser muy sensibles a la temperatura. Por lo que haciendo uso del desplazamiento de las franjas espectrales es posible implementar un sensor utilizando un circuito óptico que nos permita detectar esos cambios.

MATERIALES Y MÉTODOS

El arreglo que se utilizó para el sensor de temperatura fue una pila de capas conformada por una capa de acrílico de 186.84 μm y una oblea de silicio de 5 μm de grosor. Ambos materiales cambian sus propiedades ópticas con la temperatura, que se ven reflejados en el corrimiento de las franjas espectrales de interferómetros formados con dichos materiales.

Simulación del patrón de franjas espectrales

El patrón de franjas espectrales se puede simular utilizando la siguiente matriz [4]:

$$\mathbf{M} = \prod_{j=1}^N \mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} a & ib \\ ic & d \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde \mathbf{M}_j representa la matriz característica de cada material de la pila, en este caso tendríamos dos una del acrílico y otra de la oblea de silicio. La matriz está expresada como se muestra en la ecuación (2) [3], en la que se toma en cuenta el cambio en el índice de refracción (Δn) y en el espesor de cada material (Δd) dependiendo de la temperatura.

$$\mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2\pi(n_j+\Delta n_j)(d_j+\Delta d_j)\cos\theta_j}{\lambda}\right) & -\frac{i}{n_j} \sin\left(\frac{2\pi(n_j+\Delta n_j)(d_j+\Delta d_j)\cos\theta_j}{\lambda}\right) \\ -in_j \sin\left(\frac{2\pi(n_j+\Delta n_j)(d_j+\Delta d_j)\cos\theta_j}{\lambda}\right) & \cos\left(\frac{2\pi(n_j+\Delta n_j)(d_j+\Delta d_j)\cos\theta_j}{\lambda}\right) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde n_j es el índice de refracción, d_j es el espesor y θ_j es el ángulo de incidencia de la j -enésima capa y λ es la longitud de onda.

Para el acrílico $n_1 = 1.45$, $d_1 = 186.84 \times 10^3$ nm y para el silicio $n_2 = 3.4$ y $d_2 = 6.1 \times 10^3$ nm. Y en ambos materiales el ángulo de incidencia $\theta = 0$ rad. Δn_j y Δd_j son valores que cambian con la temperatura y se calculan mediante las siguientes formulas:

$$\Delta n_1 = (-0.42 \times 10^{-4})(T - T_0) \quad (3)$$

$$\Delta n_2 = (1.88 \times 10^{-4})(T - T_0) \quad (4)$$

$$\Delta d_1 = \left(\left(\frac{d_1}{1 \times 10^6} \right) (198 \times 10^{-6})(T - T_0) \right) (1 \times 10^6) \quad (5)$$

$$\Delta d_2 = \left(\left(\frac{d_2}{1 \times 10^9} \right) (2.6 \times 10^{-6})(T - T_0) \right) (1 \times 10^3) \quad (6)$$

Donde T es la temperatura aplicada, y $T_0 = 300$ K.

La reflectancia de cada capa se puede obtener utilizando la siguiente definición [4]:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & ib \\ ic & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_e \end{bmatrix} \quad (7)$$

Donde n_e es el índice de refracción del medio de salida, que en este caso es el aire $n_e = 1$. Finalmente se puede obtener la reflectividad de cada capa mediante (8) [3]:

$$R = \left(\frac{n_0 B - C}{n_0 B + C} \right) \left(\frac{n_0 B - C}{n_0 B + C} \right)^* \quad (8)$$

Para caracterizar el espectro de reflectividad, se creó un vector de temperatura para obtener la simulación de varios espectros y observar el comportamiento de estos aplicando diferentes temperaturas.

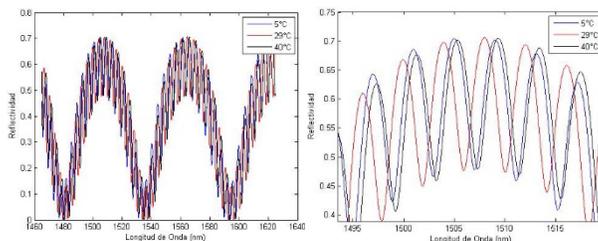


IMAGEN 1: En la parte izquierda de la imagen se muestran tres de las franjas espectrales simuladas. En la parte derecha se observa a detalle como las franjas se van recorriendo con la temperatura.

Una vez creados los espectros para cada temperatura, se implementó la simulación de un láser en una longitud de onda de 1561.5 nm. Se simuló la iteración de cada espectro obtenido con la emisión del láser y

posteriormente se integró el resultado consiguiendo así modelar la señal de salida S_o del sensor de temperatura.

Señal de Salida

Hasta este punto de la simulación no se ha determinado el voltaje de salida, con respecto al cambio de la temperatura, para ello es necesario determinarlo mediante la siguiente ecuación:

$$V_{o_{min}} = (P_L S_o G + I_{DARK}) R_L \quad (9)$$

Donde

P_L = Es la potencia del láser, en nuestro caso fue de $16\mu W$.

G = Responsitivity del detector empleado, en nuestro caso fue de $1 A/W$.

I_{DARK} = Dark Current del detector en nuestro caso es de $700 \times 10^{-12} A$.

R_L = Load Resistance del circuito, que fue de $1 M\Omega$

Una vez obtenido el voltaje para la señal de salida, debemos especificar el rango de voltaje mínimo que se puede medir con el sensor utilizando la siguiente ecuación:

$$V_{o_{min}} = (NEP \times G + I_{DARK}) R_L \quad (10)$$

Donde

NEP = Noise equivalent power, para el detector usado $NEP = 1.5 \times 10^{-15}$.

Por tanto, la medición del sensor debe ser superior a 7×10^{-4} Volts para que sea una medición válida, por debajo de este voltaje lo que se detecta puede ser ruido.

Caracterización y obtención de muestras

Para confirmar los resultados simulados se realizó la caracterización de las capas del acrílico y la oblea de silicio aplicando diferentes temperaturas, para obtener algunas franjas espectrales.

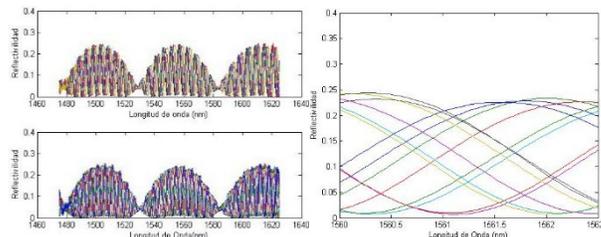


IMAGEN 2: La imagen de la izquierda muestra las franjas espectrales que se obtuvieron de la caracterización. En la parte derecha se muestra a detalle el recorrido de dichas franjas en una longitud de onda de 1560-1562 nm.

El arreglo óptico utilizado para la realización del sensor consta básicamente de un láser que interactúa con la oblea de silicio y la capa de acrílico, que posteriormente realiza la integración con ayuda de un fotodetector,

con el cuál se logra establecer un valor eléctrico (voltaje) en función de la temperatura aplicada cambiando la temperatura de la oblea con ayuda de un TEC estándar impulsado con un controlador.

Para cada muestra se estuvo monitoreando con ayuda del Analizador de Espectros Ópticos (OSA), la interacción del láser con las capas de silicio y el acrílico para verificar los cambios espectrales debidos al cambio en la temperatura, estos cambios se reflejan en la amplitud del espectro del láser.

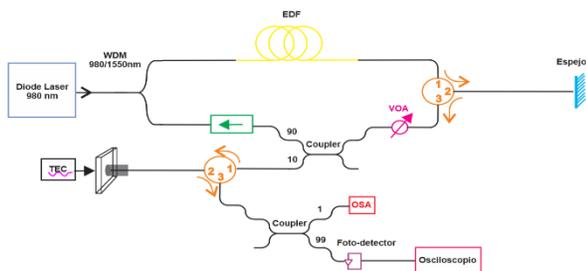


IMAGEN 3: Circuito óptico utilizado para la creación del sensor de temperatura óptico.

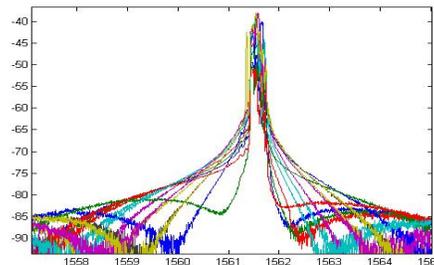


IMAGEN 4: La figura muestra el cambio en la amplitud del espectro luego de interactuar con el láser y haciendo cambios en la temperatura del silicio y el acrílico.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados de la simulación y de las muestras obtenidas experimentalmente, siguen un comportamiento similar.

Como se observa en la imagen 5 la respuesta del cambio de voltaje en función de la temperatura se comporta como una función senoidal, lo cual indica que el rango de medición de cada sensor es muy corto debido a que el voltaje estaría cambiando de manera cíclica, sin embargo, se puede apreciar que ocurren cambios de voltaje muy grandes para cambios de temperatura pequeños.

Para calcular la resolución del sensor se tomó un rango de temperatura específico de 5°C a 13°C que cubre el intervalo entre un valle y una cresta de una franja. Posteriormente, con Matlab se ajustó con un polinomio de cuarto grado la curva de ese rango de temperatura.

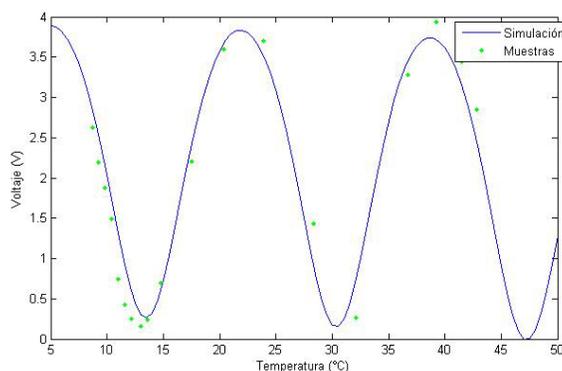


IMAGEN 5: Grafica que muestra el comportamiento del cambio del voltaje en función de la temperatura. Se observa que las muestras medidas siguen la misma tendencia que las que se simularon.

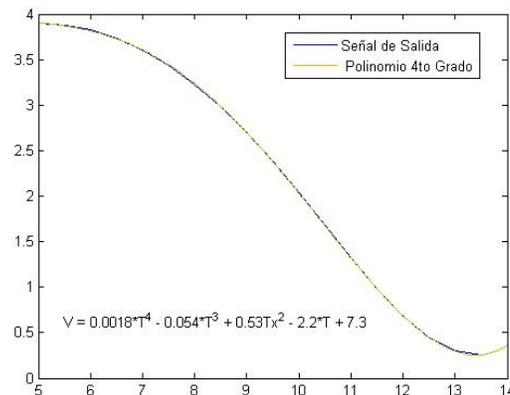


IMAGEN 6: Se muestra el ajuste del polinomio de 4to grado a la curva de la señal de salida en un rango de 5°C a 13°C.

Para determinar la cantidad de grados centígrados mínima que puede detectar el sensor se evaluó el polinomio con la temperatura mínima en ese rango.

$$T_{\min} = 5^{\circ}\text{C}$$

$$V(5) = 3.925 \text{ V}$$

Como el voltaje en ese rango disminuye conforme la temperatura aumenta, a $V(5)$ se le restó el voltaje mínimo que se puede medir calculado anteriormente con (10).

$$V(T_x) = 3.925 \text{ V} - 7 \times 10^{-4} \text{ V} = 3.9243$$

Se calculan las raíces del polinomio igualado a $V(T_x)$ para encontrar el cambio mínimo de temperatura que puede ser medida con el sensor.

$$0.0018T^4 - 0.054T^3 + 0.53T^2 - 2.2T + 3.3757 = 0$$

Luego de encontrar las raíces se toma la más acercada al valor de la temperatura mínima.

$$\text{Por lo tanto, } \Delta T_{\min} = 5 - 5.014 = 0.014^{\circ}\text{C}$$

Con esto podemos decir que el sensor tiene una alta resolución, debido a que puede medir cambios pequeños en la temperatura del orden de 0.014°C .

CONCLUSIONES

La resolución del sensor de temperatura creado en este trabajo de investigación es la mayor ventaja que tiene, a comparación de otros sensores usados en la actualidad (RTDs, termistores, sensores de circuito integrado (IC) y termopares, etc.) que cuentan con una resolución mucho más grande que el aquí presentado. La limitante es el rango de temperatura de medición, el sensor debe usarse específicamente para un rango de temperatura pequeño. Puede ser usado para situaciones en las que se requiera mantener un nivel de temperatura determinado, así el sensor detectará pequeños cambios y ayudará a tener un mejor control en el nivel de temperatura deseado.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad de Guanajuato, por permitirme participar en este programa y prestar sus instalaciones para la realización del trabajo presentado; y al Dr. Everardo Vargas Rodríguez por compartir sus conocimientos y apoyarme en el desarrollo del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Sandoval Ibarra, F.;(2000). El silicio y sus propiedades como material sensor. *Revista Mexicana de Física*, 47(2),109.
- [2] Gallegos-Arellano, E.; Vargas-Rodriguez, E.; Guzman-Chavez, A. D.; Cano-Contreras, M.; L. Cruz. J. & Raja, I. R.; (2016). Finely tunable laser based on a bulk silicon wafer for gas sensing applications. *Laser Physics Letters*, 13(6),2.
- [3] Komma, J.; Schwarz, C.; Hofmann, G.; Heinert, D. & Nawrodt, R. (2012). Thermo-optic coefficient of silicon at 1550 nm and cryogenic temperaturas. *Applied Physics Letters*, 101(4),1.
- [4] Vargas-Rodriguez, E.; Guzmán-Chavez, A.D; Cano-Contreras, M; Gallegos-Arellano, E.; Jauregui-Vazquez, D; Hernández-García, J.C; Estudillo-Ayala, J. M. & Rojas-Laguna, R. (2015). Analytical Modelling of a Refractive Index Sensor Based on an Intrinsic Micro Fabry-Perot Interferometer. *Sensors*, 15(10),26128-26142.