Espectrómetro de transformada de Fourier implementado mediante guías de onda en espiral con base de silicio

Fourier-Transform spectrometer implemented in silicon-based spiral waveguides

Aitor V. Velasco^(1,*S), Pavel Cheben⁽²⁾, Przemek Bock⁽²⁾, Jens H. Schmid⁽²⁾,
Jean Lapointe⁽²⁾, André Delâge⁽²⁾, Siegfried Janz⁽²⁾, María L. Calvo^(1,S),
Dan-Xia Xu⁽²⁾, Mirosław Florjańczyk⁽²⁾

1. Departamento de Óptica, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040, Madrid, Spain.

2. National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario K1A 0R6, Canadá.

(*) Email: avillafr@pdi.ucm.es

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Recibido / Received: 10/09/2012. Revisado / Revised: 15/01/2013. Aceptado / Accepted: 16/01/2013.

DOI: <http://dx.doi.org/10.7149/OPA.46.2.99>

RESUMEN:

En este trabajo se presenta el diseño, fabricación y caracterización de un micro-espectrómetro de transformada de Fourier implementado mediante guías de ondas planas. El dispositivo comprende un *array* de 32 interferómetros Mach-Zehnder con diferencias de caminos ópticos crecientes entre los brazos de los interferómetros, alcanzando una resolución de 0.1 nm en un rango espectral libre de 1.6 nm. Se han utilizado guías de onda de silicio en estructuras espirales en los brazos de los interferómetros para conseguir reducir el tamaño del dispositivo por debajo de 12 mm².

Palabras clave: Espectrómetro, Silicio, Transformada de Fourier.

ABSTRACT:

In this work we present the design, fabrication and characterization of a Fourier-Transform micro-spectrometer implemented with planar waveguides. The device comprises an array of 32 Mach-Zehnder interferometers with increasing optical path differences between the arms of the interferometer, reaching a resolution of 0.1 nm in a free spectral range of 1.6 nm. Silicon waveguides in a spiral structure have been used in the arms of the interferometer, reducing the footprint of the device below 12 mm².

Key words: Spectrometer, Silicon, Fourier Transform.

REFERENCIAS Y ENLACES / REFERENCES AND LINKS

- [1]. P. Cheben, "Wavelength dispersive planar waveguide devices: Echelle gratings and arrayed waveguide gratings", Chap. 5 in *Optical Waveguides: From Theory to Applied Technologies*, M. L. Calvo, V. Lakshminarayanan, Edts., CRC Press, London (2007).
- [2]. P. Cheben, J. H. Schmid, A. Delâge, A. Densmore, S. Janz, Lamontagne, J. Lapointe, E. Post, P. Waldron, D.-X. Xu, "A high-resolution silicon-on-insulator arrayed waveguide grating microspectrometer with submicrometer aperture waveguides", *Opt. Express* **15**, 2299-2306 (2007). [DOI](#)
- [3]. P. Cheben, I. Powell, S. Janz, D.-X. Xu, "Wavelength-dispersive device based on a Fourier-transform Michelson-type arrayed waveguide grating", *Opt. Lett.* **30**, 1824-1826 (2005). [DOI](#)
- [4]. M. Florjańczyk, P. Cheben, S. Janz, A. Scott, B. Solheim, D. X. Xu, "Multiaperture planar waveguide spectrometer formed by arrayed Mach-Zehnder interferometers", *Opt. Express* **15**, 18176-18178 (2007). [DOI](#)

- [5]. P. Jacquinot, "The luminosity of spectrometers with prisms, gratings, or Fabry-Perot etalons", *J. Opt. Soc. Am.* **44**, 761-765 (1954). [DOI](#)
- [6]. J. M. Harlander, F. L. Roesler, J. G. Cardon, C. R. Englert, R. R. Conway, "A spatial heterodyne spectrometer for remote sensing of Earth middle atmosphere", *Appl. Opt.* **41**, 1343-1345 (2002). [DOI](#)
- [7]. K. Okamoto, H. Aoyagi, K. Takada, "Fabrication of Fourier-transform, integrated-optic spatial heterodyne spectrometer on silica-based planar waveguide", *Opt. Lett.* **35**, 2103-2105 (2010). [DOI](#)
- [8]. M. Florjańczyk, C. Alonso-Ramos, P. Bock, A. Bogdanov, P. Cheben, Í. Molina-Fernández, S. Janz, B. Lamontagne, A. Ortega-Moñux, A. Scott, K. Sinclair, B. Solheim, D.-X. Xu, "Development of a Fourier-transform waveguide spectrometer for space applications", *Opt. Quant. Elect.* **44**, 549-556 (2012). [DOI](#)
- [9]. P. Cheben, P. J. Bock, J. H. Schmid, J. Lapointe, S. Janz, D.-X. Xu, A. Densmore, A. Delâge, B. Lamontagne, T. J. Hall, "Refractive index engineering with subwavelength gratings for efficient microphotonic couplers and planar waveguide multiplexers", *Opt. Lett.* **35**, 2526-2528 (2010). [DOI](#)
- [10]. P. R. Griffiths, J. A. de Haseth, *Fourier Transform Infrared Spectrometry*, John Wiley & Sons, New York (2007). [DOI](#)

1. Introducción

Existe la necesidad de desarrollar espectrómetros compactos de alta resolución para un amplio abanico de aplicaciones, tales como redes de comunicaciones ópticas, diagnóstico médico, sensado medioambiental e instrumentación espacial, entre otros [1]. Las redes de guías de onda en *array* (*Arrayed Waveguide Gratings*, AWGs) permiten obtener resoluciones por debajo de 1 nm [2], pero requieren una guía de onda de entrada mono-modo, limitando notablemente su rendimiento óptico (*étendue*). Este parámetro supone un elemento crítico para el análisis de fuentes incoherentes y extendidas espacialmente. Recientemente, se han propuesto espectrómetros de transformada de Fourier (FT) con guías de onda planas basados en el principio de espectroscopía espacial heterodina (*Spatial Heterodyne Spectroscopy*, SHS) [3,4]. SHS es una técnica interferométrica basada en el interferómetro de Michelson [5], en la cual se sustituyen los espejos móviles por redes de difracción [6]. El concepto teórico de los SHS puede ser implementado mediante arrays de interferómetros Mach-Zehnder (*Mach-Zehnder Interferometer*, MZI) con diferencias crecientes de caminos ópticos [4,7,8]. El análisis completo del espectro dentro del rango espectral libre del dispositivo se realiza en una sola medida mediante análisis de Fourier del patrón interferencial estacionario de salida.

En este trabajo, presentamos un espectrómetro SHS-FT con una gran resolución

en un pequeño tamaño mediante la implementación de estructuras espirales de guías de onda densamente enrolladas en un array de MZIs. Las guías de onda en espiral permiten obtener mayores retardos ópticos en un menor espacio, consiguiendo en consecuencia dispositivos más compactos y con mayor resolución. Adicionalmente, el presente trabajo demuestra experimentalmente una técnica matemática de recuperación espectral capaz de compensar errores de fase y amplitud del dispositivo.

2. Principio de operación

Nuestro espectrómetro de transformada de Fourier comprende un array de N interferómetros MZI con diferencia de caminos ópticos ΔL_i creciente, lo cual se consigue combinando en cada MZI un brazo con una guía de onda recta y otro brazo con una guía de onda en espiral. Gracias al alto contraste de índice de refracción de la plataforma de silicio sobre aislante (SOI), se pueden conseguir espirales con una gran diferencia de caminos ópticos en un diámetro reducido de tan sólo unos cientos de micrómetros.

Para una distribución espectral de entrada determinada, la naturaleza dispersiva de los MZIs produce un patrón oscilatorio dependiente de la longitud de onda (interferograma $F(x_i)$) a la salida del dispositivo, permitiendo la recuperación del espectro completo de entrada

pin mediante transformación de Fourier discreta del interferograma [4]:

$$p_{in}(\sigma) = \frac{\Delta x_{\max}}{N} P_{in} + 2 \frac{\Delta x_{\max}}{N} \sum_{i=1}^N F(x_i) \cos 2\pi \sigma x_i, \quad (1)$$

donde x_i es el desfase de camino óptico del i -ésimo interferómetro MZI, $\Delta x_{\max}$ es la máxima diferencia de caminos ópticos, P_{in} es la potencia óptica de entrada, y σ es el número de onda relativo al número de onda de Littrow σ_L . La resolución $\delta\lambda$ y rango espectral libre $\Delta\lambda$ del espectrómetro quedan determinados por $\delta\lambda = \lambda_0^2 / (\Delta L_{\max} n_{eff}) = 2\Delta\lambda / N$, donde λ_0 es la longitud de onda central del espectrómetro y n_{eff} es el índice de refracción efectivo del modo de la guía de onda.

Las posibles distorsiones del interferograma, producidas por diferencias en las pérdidas de propagación a lo largo del array de MZIs y por los errores de fase surgidos por imperfecciones de fabricación, deben ser calibradas y corregidas en el algoritmo de recuperación espectral.

3. Diseño y fabricación

El espectrómetro SHS-FT comprende 32 MZIs con una diferencia máxima de caminos físicos $\Delta L_{\max} = 1.13$ cm. Con un índice de refracción efectivo estimado $n_{eff} = 2.12$ para polarización TM a una longitud de onda de $1.55 \mu\text{m}$, el dispositivo está diseñado para una resolución de 0.1 nm en un rango espectral libre de 1.6 nm. Para

Fig. 1. Esquema del espectrómetro de transformada de Fourier con espirales de longitud creciente a lo largo del array.

simplificar las medidas ópticas, se utilizó una única entrada, seguida de divisores 1:2 en cascada. Asimismo, se incluyeron acopladores por debajo de longitud de onda (*subwavelength*) [9] de alta eficiencia tanto a la entrada como a la salida del chip.

Las muestras fueron fabricadas en substratos SOI con una capa de $0.26 \mu\text{m}$ de silicio y una capa de $2 \mu\text{m}$ de dióxido de silicio. Todas las estructuras fueron definidas en un sólo paso de creación de patrones mediante litografía de haz de electrones, utilizando una resistencia de silsesquioxano de hidrógeno (*Hydrogen silsesquioxane*, HSQ) de alto contraste. Los patrones se transfirieron a la capa de silicio mediante grabado de iones reactivos por plasma acoplado inductivamente (*Inductively Coupled Plasma - Reactive Ion Etching*, ICP-RIE).

4. Resultados experimentales

El dispositivo fabricado se estabilizó térmicamente utilizando una etapa Peltier posicionada bajo el chip, y con una precisión de 0.1°C . La salida del interferograma fue caracterizada utilizando un láser de semiconductor ajustable de alta resolución en el rango $1549 \text{ nm} - 1551 \text{ nm}$, con un paso de longitud de onda de 1 pm y una potencia de 1 mW (Fig. 2). Se utilizó un controlador de polarización para seleccionar el modo TM a la entrada del espectrómetro. Los errores de fase y las pérdidas de propagación fueron corregidos mediante el algoritmo de recuperación espectral, previa caracterización mediante ajuste de la señal de salida de cada MZI, dependiente de la longitud de onda, a una señal sinusoidal. Los resultados experimentales muestran un índice de refracción efectivo medio de 2.18 , con

Fig. 2. Imagen de microscopía de uno de los interferómetros Mach Zehnder con guía de onda en estructura espiral del dispositivo fabricado.

Fig. 3. (a) Esquema del sistema experimental de caracterización del espectrómetro integrado. (b) Distribución de potencias de salida de los 32 interferómetros Match-Zehnder para un escaneo en longitud de onda de 2 nm centrado en 1.55 μ m.

variaciones por debajo del 1% a lo largo del *array* de MZIs. Estas variaciones son suficientes para generar errores de fase aleatorios (desviación típica en torno a 2 radianes) que impiden el alineamiento de las salidas del *array* de MZIs en el número de onda de Littrow y requieren por lo tanto de técnicas de recuperación espectral que compensen las distorsiones del interferograma. Las medidas experimentales mostraron asimismo pérdidas de propagación de -5.7 dB en las guías de onda espirales.

El funcionamiento del dispositivo fue comprobado mediante dos tipos distintos de análisis numérico del patrón de salida. En primer lugar se utilizó una técnica de búsqueda espectral [10], basada en la comparación del interferograma medido con los patrones obtenidos para todas las longitudes de onda del paso de calibración (Fig. 3(a)). En segundo lugar, se utilizó una recuperación espectral basada en transformada de Fourier. Las oscilaciones en la salida de cada MZI obtenidas en el paso de calibración fueron utilizadas para definir una matriz de transformación T de tamaño $N \times N$, tal

Fig. 4. (a) Medida de similitud de la técnica de búsqueda espectral para una fuente de banda estrecha centrada en 1550 nm, y (b) espectro recuperado mediante transformada discreta de Fourier de dicha fuente.

que $F(x) = p_{in}T$, teniendo en cuenta los errores de fase y amplitud medidos. El espectro de entrada discreto de la medida fue obtenido al multiplicar el patrón de salida por una pseudo-inversa T^+ de la matriz de transformación (Fig. 3(b)).

El primer método, basado en medidas de similitud, permite determinar la longitud de onda central de espectros con un sólo pico en el rango espectral bajo análisis, y proporciona una medida de la ortogonalidad de la base de la transformación que relaciona los interferogramas de salida y los espectros correspondientes. El segundo método, basado en el cálculo de la matriz de transformación, incorpora toda la información experimental del dispositivo, permitiendo recuperar espectros complejos con una resolución de 0.1 nm y compensando cualquier error de fase y amplitud del dispositivo.

Las variaciones en la temperatura modifican el índice de refracción efectivo y en consecuencia, la distribución de energía en los patrones de salida. No obstante, estas variaciones son corregidas por el proceso de recuperación espectral, ya que son incorporadas a la matriz de transformación durante el paso de calibración del dispositivo.

5. Conclusiones

Se ha demostrado un espectrómetro espacialmente heterodino de transformada de Fourier en guías de onda de silicio. El espectrómetro comprende un array de interferómetros Mach-Zehnder desbalanceados mediante desfases implementados con guías de onda en espiral. Los errores de fase y las pérdidas de propagación de los MZI fueron caracterizadas y compensadas. El uso de espirales densamente enrolladas permite una elevada resolución espectral de 0.1 nm en un dispositivo de tan sólo 12 mm². La excelente

resolución y pequeño tamaño del dispositivo permite su uso en diversas aplicaciones como sensores médicos y ambientales desechables, instrumentación de espectroscopía de mano, y sensado para plataformas de micro-satélites.

Agradecimientos

A. V. Velasco agradece el apoyo económico proporcionado por el Ministerio de Economía a través de los proyectos TEC2008-04105 y TEC2011-23629.