

Montaje del sistema experimental y primeros resultados de medida de termómetros nanofotónicos de Si

A. Casas, M. J. Martín

Centro Español de Metrología, calle Alfar, 2. 28760 Tres Cantos, (Madrid)

RESUMEN: Hoy en día existe una necesidad creciente de realizar mediciones de temperatura a una escala cada vez más pequeña, pero los termómetros actuales no pueden satisfacer este reto. La nanotecnología nos ofrece la posibilidad de construir sensores capaces de medir la temperatura en la escala micro y nanométrica gracias a la tecnología de fabricación de dispositivos en silicio (Si). En particular, está bastante extendida la nanofabricación de sensores de tipo fotónico, basados en la interacción entre la luz y la materia. El proyecto EMPIR PhotoQuanT [1] ha combinado fotónica y nanotecnología para el desarrollo de sensores fotónicos y optomecánicos para la medida de la temperatura en la escala nano/micrométrica, que podrán contribuir a la diseminación del nuevo kelvin. El CEM ha participado en este proyecto europeo centrándose en el desarrollo de los sistemas experimentales necesarios para la medida de termómetros nanofotónicos basados en Si en espacio libre. En esta ponencia se describe el montaje desarrollado (laser, analizador de componentes de alta definición, nanoposicionadores, microscopio, etc), los primeros resultados de medidas con sensores nanofotónicos y las principales variables de influencia que se han estudiado (estabilidad en temperatura, longitud de onda, velocidades de muestreo, autocalentamiento, etc).

1. INTRODUCCIÓN

Los termómetros más precisos en la actualidad son los termómetros de resistencia de platino (TRP) en el que el elemento sensible consiste en un bobinado de platino situado en el extremo del encapsulado del termómetro. Este termómetro es extremadamente sensible a perturbaciones mecánicas y ambientales, como la humedad y la contaminación química, lo que provoca que el valor de la resistencia varíe con el tiempo causando irreproducibilidad en las medidas. Para evitar esto se necesitan calibraciones frecuentes, las cuales son costosas y requieren un valioso tiempo en el que el termómetro queda inutilizado.

En los últimos años ha habido un gran interés en el desarrollo de dispositivos fotónicos como alternativa a los termómetros de resistencia ya que superan las limitaciones asociadas a estos presentando una mayor robustez a las perturbaciones mecánicas y siendo insensibles a las interferencias electromagnéticas. Además, se pueden miniaturizar hasta la escala nanométrica, lo que permite una resolución espacial mucho mayor.

Estos dispositivos fotónicos se basan en el cambio de las propiedades de un material debido a la temperatura, generalmente en el efecto termo-óptico y en la dilatación térmica.

En este nuevo campo de investigación, el CEM ha participado en el proyecto EMPIR PhotoQuanT [1] dedicado a establecer la viabilidad en Europa de la fabricación y uso de sensores fotónicos y optomecánicos para la medida de la temperatura en la escala nano/micrométrica, que se espera puedan contribuir a la diseminación del nuevo kelvin. En concreto el trabajo del CEM se ha centrado en el desarrollo de los sistemas experimentales necesarios para la medida de termómetros nanofotónicos basados en Si en espacio libre.

2. DESARROLLO/DESCRIPCIÓN

El sistema experimental desarrollado por el CEM sirve para medir resonadores fotónicos que pueden ser de varios tipos: de anillo [2] o cristal fotónico [3]. En ambos casos, la luz proveniente de un láser infrarrojo sintonizable de alta estabilidad se introduce en el dispositivo a través de una fibra óptica sub-milimétrica que se acopla a una guía de onda en el chip la cual está en contacto evanescente con el resonador. La salida de la luz de dicha guía se recoge con otra fibra y se lleva a un detector. En la figura 1 se muestra una foto de las fibras sobre el dispositivo y en la figura 2 uno de los dispositivos fabricado en Si en el ISOM¹ del tipo resonador de cristal fotónico.

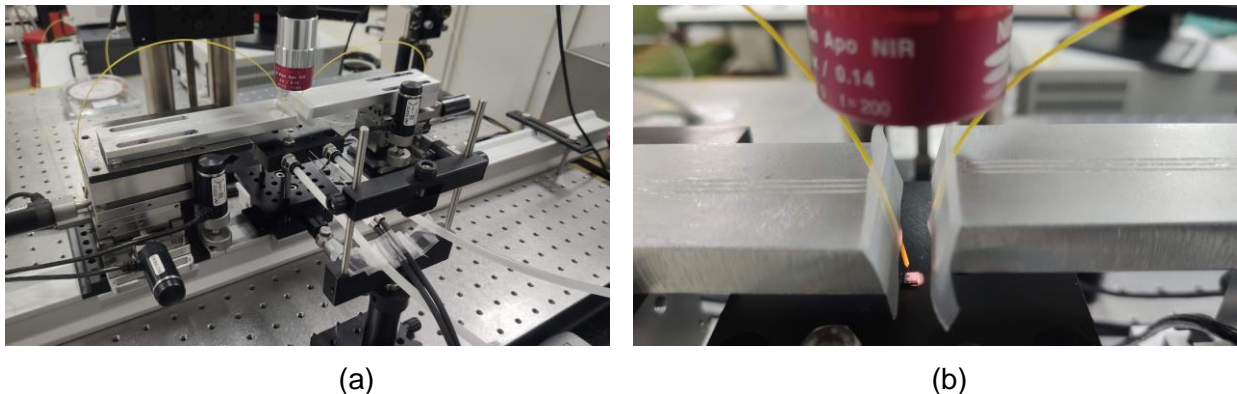


Fig.1. Montaje experimental para la medida de sensores fotónicos. (a) Vista general con el sistema de nano-posicionamiento y microscopio (b) Detalle de la caída de las fibras sobre el chip que contiene los micro-sensores.

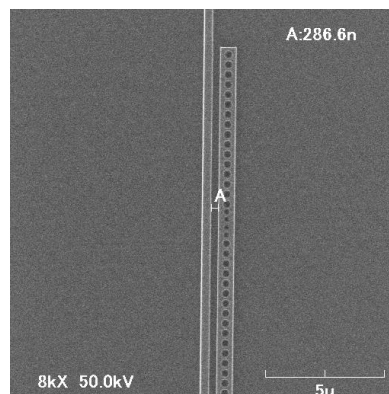


Fig. 2. Sensor nano-fotónico en Si tipo cristal fotónico, diseñado por el Instituto de Micro y Nanotecnología del CSIC [4] y fabricado por el ISOM. La parte izquierda es la guía de onda y la parte derecha con los “agujeros” es el resonador óptico.

¹ ISOM: Instituto de Sistemas Optoelectrónicos y Microtecnología de la Escuela de Ingenieros de Telecomunicaciones de la UPM, perteneciente a la red Española de Salas Blancas de Micro y Nanofabricación (MicroNanoFabs) (ICTS de la red del Ministerio de Ciencia)

La luz que entra por la guía es atrapada por la cavidad óptica a una única longitud de onda correspondiente a la resonancia del dispositivo, que depende de sus parámetros geométricos y del material utilizado (ver figura 3, donde está dibujado el caso de una geometría en anillo).

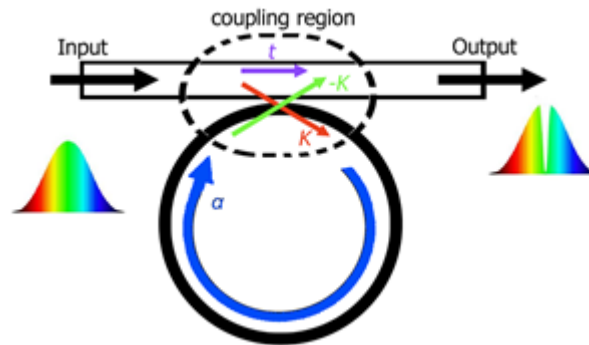


Fig. 3. Esquema del principio de funcionamiento de un sensor fotónico.

El acoplamiento de la luz se produce por el fenómeno de campo evanescente, esto implica que no existe contacto físico entre el anillo y la guía de onda, a esta distancia se le llama gap de aire (*air gap*). Elegir las dimensiones adecuadas también es un factor importante porque se requiere que se cumpla la propagación monomodo del modo transversal eléctrico (TE) de la luz.

La dependencia de la longitud de onda de la resonancia con la temperatura surge de los cambios provocados por esta en el índice de refracción y en las dimensiones físicas del resonador: para cada temperatura tenemos una longitud de onda de resonancia, midiéndose la sensibilidad del dispositivo en m/K.

En el caso del CEM, el sistema experimental de medida de estos dispositivos se basa en un láser sintonizable en la banda de 1550 nm y un detector. Inicialmente ambos sistemas eran independientes, utilizándose como referencia de longitud de onda de entrada un medidor de longitud de onda (*wavelength meter*) y a la salida un detector de InGaAs. Este sistema implicaba un desfase entre la medida de la longitud de onda y el registro del espectro de salida por lo que fue sustituido por un analizador de componentes de alta definición (HDCA) que toma control del láser y realiza los espectros en tiempo real. En la figura 4 se muestra el esquema del montaje.

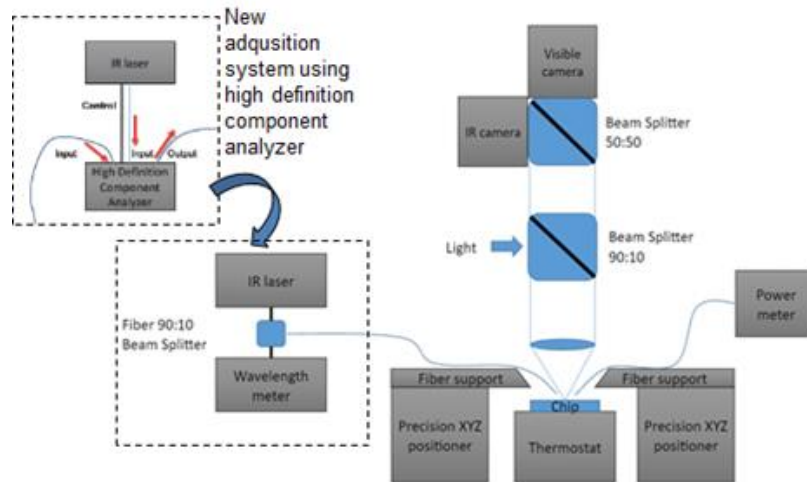


Fig. 4. Esquema del montaje experimental de medida de dispositivos fotónicos en el CEM.

Los sensores se colocan en una plataforma de aluminio termostatazada, diseñada y caracterizada en el CEM. La luz llega a dichos sensores a través de fibras ópticas sujetas por unos soportes diseñados a medida que a su vez están colocados sobre estaciones que permiten el movimiento en las direcciones XYZ con gran precisión. Estas estaciones se mueven gracias al efecto de micrómetros piezoeléctricos (nano-posicionadores). El termostato tiene un rango de 10 °C a 80 °C (controlado por el flujo de agua) y se utilizan Pt100 como patrones con una $U = 0,01$ °C [5].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las principales magnitudes de influencia estudiadas sobre el sistema de medida han sido:

- estabilización térmica: estabilidad en temperatura + influencia del flujo de agua en la estabilización de la resonancia.
- autocalentamiento: efecto de la potencia del láser sobre la medida
- medición de la longitud de onda

Para el estudio de estos parámetros se han utilizado dos muestras de ensayo del tipo resonador en anillo prestadas por el NIST y por el PTB.

3.1. Estabilización térmica

La estabilidad del termostato se ha medido con un termistor y un Pt100 a 20 °C y a 60 °C. Las mejores estabilidades obtenidas son con el termómetro Pt100 con un valor de 4 mK a 20 °C y 14 mK a 60 °C. La temperatura de la superficie se mide con una Pt100 plana pegada cerca del dispositivo. Se han estimado las siguientes incertidumbres procedentes de la medición de la temperatura superficial:

	20 °C	60 °C
Estabilidad, σ	4 mK	14 mK
Temperatura de superficie, variación max	20 mK	50 mK

Tabla 1. Características del termostato.

El baño de alta estabilidad que alimenta el termostato tiene un tornillo que permite controlar el flujo de agua. Se han realizado estudios modificando el caudal de agua y se ha observado que, a una temperatura determinada, el nivel de ruido de la señal es similar en los distintos caudales medidos, por lo que esta influencia puede despreciarse en los cálculos de incertidumbre.

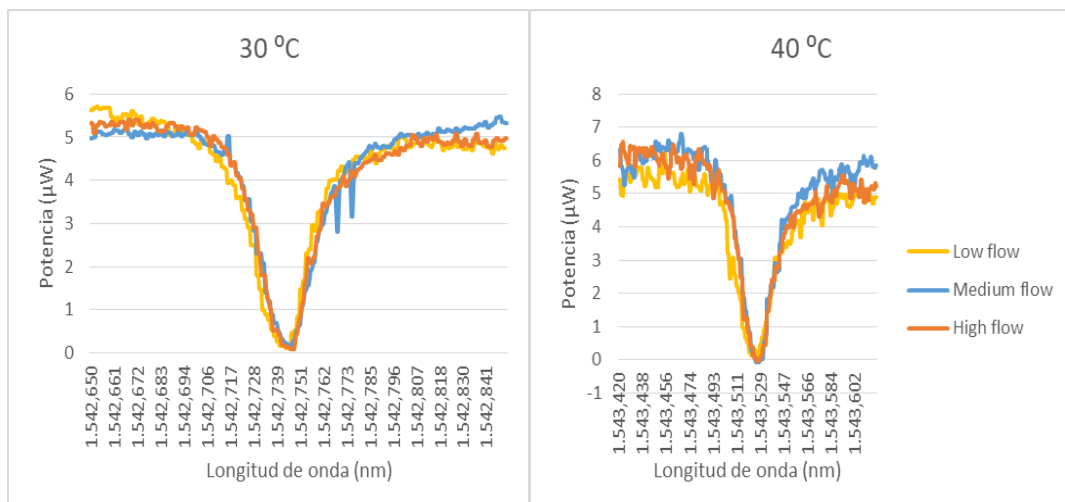


Fig. 5. Influencia del flujo de agua en la resonancia medida.

3.2. Autocalentamiento

Se han realizado medidas con distinta potencia de salida del láser para unas mismas condiciones de temperatura. Se ha observado que la forma del pico cambia, deja de tener una forma “gaussiana” y se convierte en más asimétrico (ver figura 6)

Este comportamiento se debe al autocalentamiento del dispositivo. El autocalentamiento es diferente para cada material debido a las distintas energías de la banda prohibida (*bandgap*) y a la acumulación de intensidad dentro de resonador. Esto puede distorsionar la precisión de la medición de la temperatura si no se controla. El efecto del autocalentamiento es proporcional a la potencia absorbida y es aún más pronunciado en el caso de los materiales de alto índice de refracción (debido al fuerte confinamiento de la luz en las guías de onda monomodo) y los diseños con poco contacto y conductividad térmica [6]. El principal factor, incluso para potencias de entrada moderadas, es la absorción de dos fotones (TPA). En este caso, dos fotones se absorben simultáneamente y aparecen como un único fotón de la longitud de onda o energía combinada, que a su vez se absorbe y disipa en forma de calor. En el caso del silicio,

este efecto desempeña un papel importante debido a la baja energía de la banda prohibida (*bandgap*).

El tiempo para alcanzar el equilibrio térmico se estima en el rango de los microsegundos, lo que puede afectar al tiempo de respuesta del sensor.

Por esta razón, es fundamental determinar experimentalmente cual es la potencia máxima de bombeo de los detectores que no causa autocalentamiento.

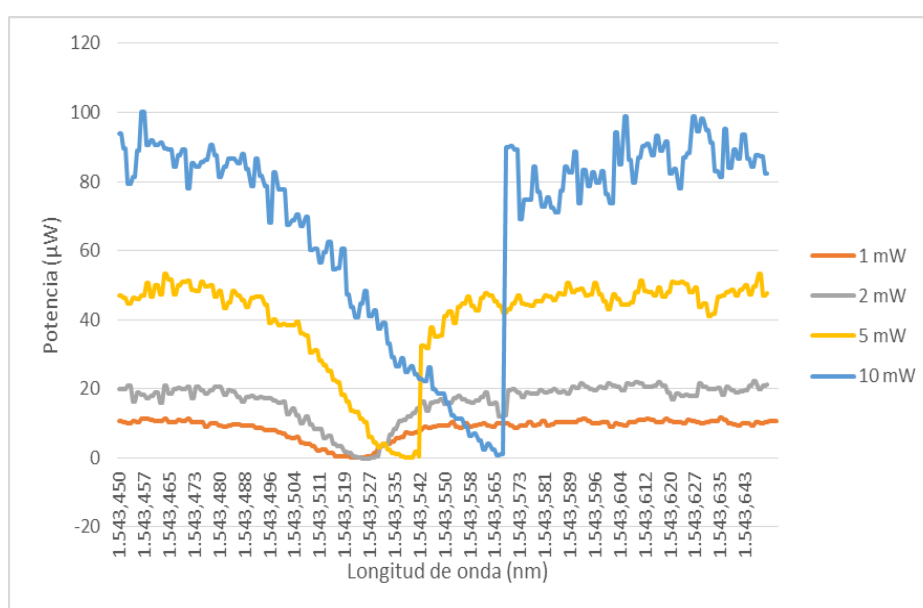


Fig. 6. Autocalentamiento medido para un resonador de anillo.

3.3. Medida de la longitud de onda

Inicialmente, la configuración de medida se basó en un láser sintonizable de alta estabilidad (SANTEC710, 1480 nm - 1640 nm, resolución 0,1 pm, estabilidad/precisión 1 ppm) y un medidor de longitud de onda (HIGH FINESSE WS5, precisión 1 ppm). El medidor de longitud de onda tiene una incertidumbre de calibración de 5×10^{-11} m.

Sin embargo, esta forma de medición no es del todo adecuada porque el registro de la señal debe activarse manualmente cuando se inicia el barrido láser. Por ello, en la última parte del proyecto se ha utilizado una nueva configuración. Esta configuración se basa en un analizador de componentes de alta definición (HDCA). Este equipo toma el control del láser y muestra el espectro a la salida del dispositivo directamente.

El HDCA es un analizador de componentes de alta definición que mide en tiempo real las pérdidas de inserción y de retorno de los dispositivos ópticos pasivos. La interfaz puede mostrar los valores máximos y mínimos de transmisión en la anchura espectral requerida con las siguientes características principales:

- Muy alta resolución: <1 MHz.
- Alta sensibilidad: -85 dBm
- Rango dinámico libre de espureos: > 90 dB.
- Medición en tiempo real, velocidad rápida.

La exactitud del equipo se basa en un interferómetro y una célula de gas en el interior del propio instrumento, por lo que se auto-calibra. Las células de gas utilizadas son C + L (más de 20 líneas desde 1519 nm hasta 1632 nm). Esto da una precisión de 0.5 pm.

Ambos sistemas de medición (detector de InGaAs y HDCA) se han comparado con medidas a 20 °C y utilizando diferentes velocidades de barrido láser, y muestran el mismo comportamiento.

Respecto al detector de InGaAs las velocidades de barrido del láser han sido 0.1, 0.13, 0.2, 0.25, 0.33 y 0.5 pm/s, los resultados no muestran ninguna correlación entre las longitudes de onda a las que aparece la resonancia y la velocidad de barrido del láser (Figura 7).

Respecto al HDCA la velocidad de barrido del láser ha sido de 100 nm/s (la única disponible al ser controlado por el HDCA).

Los efectos derivados de la utilización de diferentes sistemas de medición y de la velocidad de barrido son inferiores a 0.01 nm.

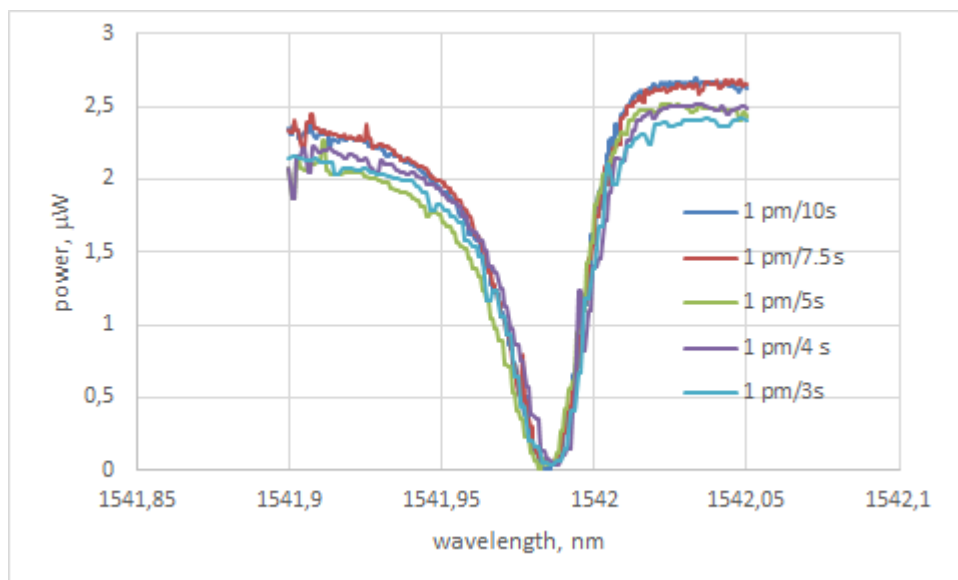


Fig. 7. Influencia de la velocidad de barrido del láser en la resonancia medida.

4. CONCLUSIONES

El CEM ha desarrollado un sistema experimental para la medida y calibración de dispositivos fotónicos para su uso como termómetros a escala micrométrica. El sistema experimental está

basado en un termostato que funciona en el rango de 20 °C a 80 °C con alta estabilidad en el que se coloca el dispositivo a medir. El acoplamiento de la luz es en espacio libre (*free space light coupling*) a través de fibras montadas en un sistema de nano-posicionamiento, estas se colocan en la zona de la muestra adecuada gracias a un microscopio.

El sistema de medida se ha caracterizado en estabilidad en temperatura y se han estudiado diversas variables que afectan a la medida de estos dispositivos (autocalentamiento, velocidades de barrido, etc.).

El sistema se va a utilizar a corto plazo para la medida de resonadores basados en cavidades de cristal fotónico en Si diseñados por el IMN-CSIC y fabricados por el ISOM.

5. REFERENCIAS

[1] “Photonic and Optomechanical Sensors for Nanoscaled and Quantum Thermometry” EMPIR Project: 17FUN05. https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/project/photonic-and-optomechanical-sensors-for-nanoscaled-and-quantum-thermometry/?L=0&tx_eurametctp_project%5Baction%5D=show&tx_eurametctp_project%5Bcontroller%5D=Project&cHash=7c00047863edf54a1c55a38fde2ce9b8

[2] R. Eisermann, S. Krenek, G. Winzer, S. Rudtsch “Photonic contact thermometry using silicon ring resonators and tuneable laser-based spectroscopy” <https://doi.org/10.1515/teme-2021-0054>

[3] N. Klimov, T. Purdy, Z. Ahmed. “Towards replacing resistance thermometry with photonic thermometry”, *Sensors and Actuators A* 269, 308–312, 2028

[4] T. Briant et al “Photonic and Optomechanical Thermometry”. *MDPI Optics* 3, 159–176, 2022. <https://doi.org/10.3390/opt3020017>

[5] P. A. Postigo, L. M. Weituschat, M. J. Martin, D. del Campo “Design of optimised nanophotonic resonators for micro-scaled thermometers based in diamond” TEMPMEKO 2019, Chengdu (China) (Poster)

[6] W. Dickmann, L. M. Weituschat, R. Eisermann, S. Krenek, P. A. Postigo, S. Kroker “Heat dynamics in optical ring resonators” *Proceedings Volume 11783, Modeling Aspects in Optical Metrology VIII*; 1178309 (2021) <https://doi.org/10.1117/12.2592552>

6. AGRADECIMIENTOS

El proyecto 17FUN05 PhotoQuant “Photonic and Optomechanical Sensors for Nanoscaled and Quantum Thermometry” ha recibido financiación del programa EMPIR cofinanciado por los Estados participantes y del programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea.