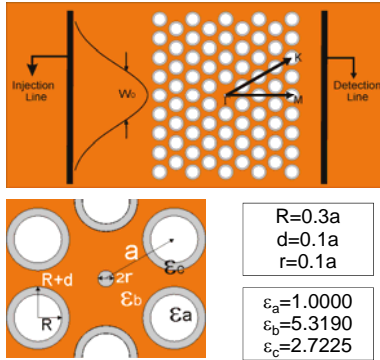


Jean DAHDAH, Nadège COURJAL, Gwenn ULLIAC et Fadi BAIDA  
Département d'Optique P.M Duffieux, Institut FEMTO-ST, UMR 6174  
Université de Franche - Comté, 16 route de Gray, 25030 Besançon cedex, FRANCE

Nous présentons une cavité photonique fonctionnalisée par une couche sensible ayant un pic d'absorption qui coïncide avec le pic de résonance de la cavité. La présence de l'analyte est détectée par une variation de l'intensité du pic de résonance qui est due non seulement à la variation de l'indice de réfraction et de l'épaisseur de la couche mais aussi à l'absorption de cette dernière. L'étude théorique de la microcavité fonctionnalisée par des couches sensibles est réalisée, en premier temps, par la méthode des ondes planes associée avec la méthode « Supercell », suivie par un calcul FDTD-2D dans lequel on a implémenté le modèle de dispersion de Lorentz pour tenir compte de l'absorption des couches. Nous montrons qu'avec la configuration présentée, une variation de transmittivité de 23% est obtenue pour une variation d'indice de  $10^{-4}$  de la couche sensible. Nous présentons aussi les premières réalisations des cavités sur un substrat de niobate de lithium et accompagnées des résultats expérimentaux et théoriques.

## Description de la structure



$$R=0.3a$$

$$d=0.1a$$

$$r=0.1a$$

$$\epsilon_a=1.0000$$

$$\epsilon_b=5.3190$$

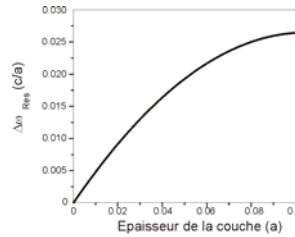
$$\epsilon_c=2.7225$$

### Description:

La structure photonique étudiée est une cavité à maille triangulaire sur MgO:LiNbO3 de permittivité  $\epsilon_a$  avec une période  $a=158$  nm. Les trous d'air de permittivité  $\epsilon_b$  et de rayon  $R=0.3a$  sont couverts d'une couche sensible, d'épaisseur  $d=0.1a$  et de permittivité  $\epsilon_c$ . Ces propriétés diélectriques changent suite à l'adsorption de molécules de gaz. La couche sensible utilisée est la Porphyrine permettant ainsi une détection spécifique du benzène. Son pic d'absorption correspond à  $\lambda=418$  nm [1].

## Résultats théoriques (FDTD + PWE)

En premier lieu, on a développé un code PWE (Plane Wave Expansion) qui tient compte de la présence de la couche sensible autour des trous. La première étape était de déterminer la structure de bande d'un cristal photonique à maille triangulaire, fonctionnalisée par la couche sensible. Pour modéliser la cavité photonique un code Supercell est développé qui tient compte de la présence du défaut dans le cristal photonique. La sensibilité de la structure à la variation de l'épaisseur de la couche est ainsi déterminée.



La Figure ci-contre montre que la position spectrale du pic de résonance croît avec l'épaisseur de la couche (redshift). Une variation de l'épaisseur de 0.04a induit un shift de  $16 \cdot 10^{-3}$  a de la fréquence de résonance.

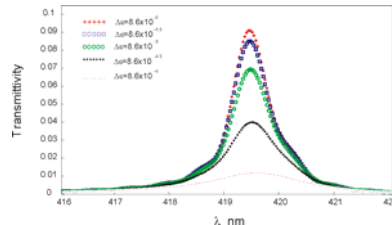
Conclusion:  $\Delta d=1$  nm  $\Rightarrow \Delta \lambda=0.5$  nm

La présence de l'analyte est détectée par une variation de l'intensité du pic de résonance qui est due non seulement à la variation de l'indice de réfraction et de l'épaisseur de la couche mais aussi à l'absorption de cette dernière. Pour étudier l'effet de l'absorption des couches, nous avons développé un code FDTD [2] qui prend en compte l'absorption des couches de porphyrine. Dans un tel algorithme, la dispersion doit être décrite par un modèle analytique. En s'appuyant sur le spectre d'extinction des monocouches, et en utilisant les relations de Kramers-Kronig [3], on a pu déduire les expressions de la permittivité complexe du matériau à l'aide d'un modèle de Lorentz [4-5]:

$$\epsilon_L(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\Delta\epsilon \Omega_L^2}{(\omega^2 - \Omega_L^2) + i\Gamma_L \omega}$$

Fréquence de résonance:  $\Omega_L=4.534 \cdot 10^{15}$  rad/s  
Largeur à mi-hauteur:  $\Gamma_L=2 \cdot 10^{14}$  rad/s

L'adsorption des molécules de gaz par la couche sensible provoque une diminution du pic d'absorption. Cette variation peut être modélisée en accordant la valeur du facteur  $\Delta\epsilon$ . La figure ci-dessous montre la transmittivité en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de  $\Delta\epsilon$ : où l'amplitude et la position du pic de résonance sont affectées.

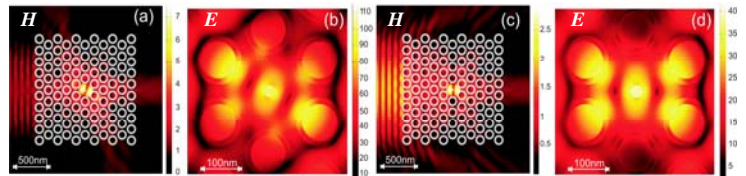


$\Delta\epsilon$  est reliée à la concentration du benzène.  $\Delta\epsilon=8.6 \cdot 10^{-6}$  correspond à 50 ppm de benzène.

La sensibilité de la structure est estimée à 3ppm.

Une variation de  $\Delta\epsilon$  d'un facteur de 10 induit une variation de 23% de la transmission à la longueur d'onde du pic de résonance. Cette variation correspond à une double modification de l'indice de réfraction ( $10^{-4}$ ) et du coefficient d'extinction de ( $6 \cdot 10^{-4}$ ).

En utilisant le code FDTD, on a pu déterminer la distribution du champ électromagnétique au niveau du défaut avec et sans le phénomène d'absorption. Les Figures (a), et (b) montrent la distribution du champ EM (racine cinquième de l'intensité du champ E et H) pour  $\Delta\epsilon=8.6 \cdot 10^{-6}$ , (c) et (d) pour  $\Delta\epsilon=8.6 \cdot 10^{-3}$ .

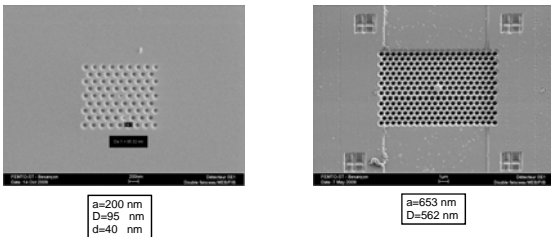


Conclusion: L'intensité du champ EM diminue d'un facteur 60 lorsque  $\Delta\epsilon$  passe de  $8.6 \cdot 10^{-6}$  à  $8.6 \cdot 10^{-3}$

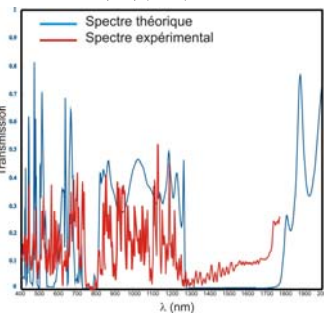
## Réalisations et résultats expérimentaux

### Technique de fabrication:

Les structures sont réalisées par une gravure ionique à l'aide d'un FIB à la centrale technologique MIMENTO de l'Institut FEMTO-ST. Les structures sont gravées sur des guides d'ondes réalisés par échange protonique (APE).



### Caractérisation optique:



Les résultats expérimentaux montrent la présence de deux bandes interdites: [690nm-870nm] et [1200nm-1750nm] et avec un taux d'extinction de ~20 dB.

Les deux spectres, théorique et expérimental, sont en bon accord. Ils montrent l'absence du mode de résonance de la cavité, qui est due non seulement au nombre de rangées dans la direction de propagation, mais aussi aux paramètres de la structure.

## Conclusion

Une telle étude présente une application originale pour des capteurs biochimiques, où les molécules à détecter peuvent être adsorbées par une couche spécifique. Cette réaction physico-chimique mène à un changement de l'absorption et de l'indice de réfraction de la couche accompagnée par un changement des paramètres du cristal photonique (rayon, épaisseur).

### Références:

1. I. Leray & al "Porphyrins as probe molecules in the detection of gaseous pollutants: detection of benzene using cationic porphyrins in polymer films." Sensors and Actuators B, vol.54, no.3, pp. 243-251, 1998.
2. F. Baida & al "Waveguiding through a two-dimensional metallic photonic crystal." Journal of Microscopy, vol.2, pp. 144-148, 2004.
3. K. Ohta and H. Ishida, "Comparison among several numerical integration methods for kramers-kronig transformation, Appl. Spectrosc., vol.42, no.6, pp. 952-957, 1988.
4. Allen Taflov, Computational Electrodynamics: The Finite - Difference Time Domain, Artech House, Incorporated, July 2005.
5. A.-Viat & al, Improved analytical fit of gold dispersion: Application to the modeling of extinction spectra with a finite-difference time-domain method, Phys. Rev. B 71(8), 085,416 (2005).