

DESIGN ET SIMULATION D'UN NOUVEAU CAPTEUR DE GAZ A OXYDE METALLIQUE.

Amer Abdeslam Aimer ¹, Fouad Kerrou ¹, Khalifa Aguir ²

¹ laboratoire de Modélisation des Dispositifs à Energies Renouvelables et Nanométriques (MODERNA), Université des frères Mentouri Constantine, 25000 Constantine, Algérie

² Laboratoire IM2NP Université d'Aix Marseille, Université de Toulon, CNRS, IM2NP, Av. E. N. Niémen, 13397 Marseille cedex 20.

Reçu le 05 Février 2017 – Accepté le 23 novembre 2017

Résumé

Nos travaux portent sur la conception et l'évaluation rigoureuse d'une nouvelle conception de capteur de gaz semi-conducteur à oxyde métallique (SMO) avec des différentes formes et tailles, afin d'évaluer la géométrie d'implantation la plus efficace en termes de consommation électrique, la stabilité de la membrane et la distribution de la température.

La conception met en œuvre des aspects innovants, permettant une amélioration de la sélectivité et de la consommation d'énergie des capteurs de gaz, ce qui rend le produit adapté à une grande variété d'applications. Pour soutenir d'avantage les résultats de la simulation, on démarre l'étude avec une validation de notre modèle à partir d'une étude comparative de plusieurs types de géométries de l'élément chauffant (spirale, méandre et anneau) sous environnement Comsol.

Le but de cette étude est de fournir un modèle amélioré, avec une température plus uniforme au niveau de la zone active (réponse avec le moins de bruit possible), ainsi qu'une réduction de cout du capteur (puissance consommée et dimensions de la puce réduite, minimiser les étapes de gravure en embarquent l'élément chauffant et les électrodes dans la même couche au-dessus de la membrane).

Mots clés: Capteur de gaz, Basse puissance, Oxyde métallique à semi-conducteur, Simulation électrothermique.

Abstract

Our work focuses on the design and rigorous evaluation of two novel designs for semiconducting metal oxide (SMO) gas sensors with different shapes and sizes, in order to assess the most efficient layout geometry in terms of power consumption, membrane stability, and temperature distribution.

The aim of this study is to provide two designs, one to be used for a thin sensing film and the other to be applied with a nanowires sensing layer.

The purpose of this study is to provide an improved model, with a more uniform temperature at the active zone (response with the least possible noise), as well as a reduction in the cost of the sensor (power consumed and dimensions of the chip reduced, minimize the etching steps by embedding the heating element and the electrodes in the same layer above the membrane).

Keywords: Gas sensor, Microheater, Low power, Semiconducting metal oxide, Electro-Thermal simulation.

ملخص

يركز عملنا على التقييم الدقيق لتصميم مستشعر الغاز الجديد لأكسيد المعادن بأشكال وأحجام مختلفة لتقييم الهندسة المناسبة لتخطيط أكثر كفاءة من حيث استهلاك الطاقة واستقرار الغشاء العازل وتوزيع متكافئ لدرجة الحرارة على مستوى الطبقة الحساسة.

التصميم يحتوي على جوانب إبداعية عديدة، مما يمكن من تحسين الانتقائية واستهلاك طاقة أقل، مما يجعل المنتج مناسباً لمجموعة متنوعة من التطبيقات.

لدم نتائج المحاكاة باستعمال برنامج على الحاسوب، بدأنا الدراسة بالتحقق من صحة نموذجنا عن طريق مقارنة لعدة أنواع من هندسة عنصر التسخين (لولبية، متعرجة وعلى شكل خاتم) والغرض الاساسي من هذه الدراسة هو تقديم نموذج محسن، مع درجة حرارة أكثر تناسقا في المنطقة الحساسة للاستشعار (استجابة بأقل ضجيج ممكن) وانخفاض تكلفة أجهزة الاستشعار (خفض استهلاك الطاقة وتصغير أبعاد الشريحة، تقليل خطوات الانتاج عن طريق ادماج عنصر التدفئة والأقطاب الكهربائية في نفس الطبقة فوق الغشاء العازل).

الكلمات المفتاحية: مستشعر الغاز، أكسيد المعادن، حساس الغازات، العنصر الحساس، المحاكاة الكهربائية الحرارية.

1. INTRODUCTION

Le nombre des applications pour les MEMS avec un élément chauffant (heater) est en développement rapide, car ce sont des composants clés dans la miniaturisation des micro-capteurs [1], tels que les capteurs de vent [2], les capteurs d'humidité [3] et les capteurs de gaz. Le capteur de gaz à oxyde métallique semi-conducteur (SMO) est en passe de devenir le capteur MEMS universel du monde, puisqu'il peut être utilisé dans de nombreuses applications émergentes telles que réseaux de capteurs, étiquettes RFID, les applications médicales, la surveillance de qualité alimentaire, dispositifs portables, etc. [4] [5], il peut être utilisé notamment dans de nombreuses applications grâce à son faible encombrement, sa sensibilité élevée et sa réponse rapide ; néanmoins, une réduction supplémentaire de la consommation d'énergie et une sélectivité améliorée sont toujours nécessaires afin de permettre une large commercialisation de ce dispositif innovant. De nos jours, la plus faible consommation d'énergie dans les capteurs de gaz SMO commercialisés est supérieure à 15 mW lorsqu'il est exploité en continu à 300°C [6] [7] [8]. Le capteur de gaz qui a été nommé en tant que finaliste dans le Prix annuel de la créativité en électronique (ACE) 2017 (CCS811) a une consommation d'énergie de 46 MW [9]. Néanmoins, il est considéré et destiné aux applications portables. Le principe de fonctionnement du capteur de gaz SMO repose sur le chauffage de la couche de détection à une température comprise entre 250°C et 550°C en utilisant l'effet Joule. La température de fonctionnement requise dépend du matériau de détection utilisé et du type de gaz ciblé. Pour atteindre et maintenir cette température, le heater est la composante clé. Différents matériaux, comme l'aluminium, le platine [10] [11], le poly silicium [12], et le cuivre [13] [14], Gold [15], Nickel-Chromium (NiCr) [16], Platinum Titanium [17], and Tungsten [18] peuvent être utilisés comme une partie du heater. Plusieurs géométries du heater ont été étudié et comparé dans le but de développer le modèle le plus approprié pour avoir la meilleure homogénéité dans la zone active avec le minimum de puissance consommée, en utilisant pour forme [19], le serpent, la spirale, et anneau [20]. La couche du heater est supporté par une membrane diélectrique. Cette membrane joue le rôle d'une isolation électrique qui peut fonctionner sous des températures élevées dans le but d'atteindre une distribution uniforme de la température le long de la géométrie. Pendant des décennies, les oxydes de métaux ont été les plus largement utilisés matériaux pour la détection de gaz en raison de leur capacité à réagir avec le dioxygène [21]. Parmi les plus couramment utilisés sur le marché commercial sont le dioxyde d'étain (SnO₂), l'oxyde de zinc (ZnO), et trioxyde de tungstène (WO₃), car ils satisfont à toutes les exigences pour une bonne performance de détection de gaz [22] [23] [24], comparé à d'autres, tels que In₂O₃, ITO, CdO, ZnSnO₄, Nb₂O₅ etc. [25] [26] [27]. Ces matériaux peuvent être déposés sur le dessus d'une membrane suspendue en utilisant une variété de techniques et sous différentes formes telles que le film mince, le nanocomposant, le nanoball, et nanofils.

La température est nécessaire au bon fonctionnement du capteur, pour améliorer sa sensibilité, les phénomènes d'adsorption – désorption et pour accélérer son temps de réponse. Elle est assurée par l'élément chauffant qui joue un rôle crucial, surtout au niveau de la stabilité de la réponse de

ces capteurs. Dans un premier lieu, nous nous sommes intéressés au meilleur moyen de contrôler la température et son homogénéité sur la zone sensible du capteur. Ceci passe par un design et un dimensionnement approprié du heater. Dans ce travail, nous avons simulé plusieurs types de géométries de l'élément chauffant (spirale, méandre et anneau) sous Comsol Multiphysics, Il a été constaté que la forme spirale est le plus approprié, dans l'uniformité de la température et la consommation d'énergie. Afin d'améliorer la réponse du capteur nous avons simulé deux types de dispositifs avec deux types de couches sensibles (SnO₂ et WO₃) en utilisant la forme spirale comme élément chauffant. Dans un deuxième temps, on valide notre modèle (capteur avec un heater d'une forme spirale simple) avec celui de [1] qui a été simulé et réalisé, on constate que la température dans la zone active de notre modèle est concentrée dans le centre de la zone active. Pour résoudre ce problème, on a calculé la densité de courant dans les pistes du heater qui fait 10µm de largeur et 10µm de distance entre les pistes. On remarque que si on augmente la largeur entre les pistes graduellement en allant de 8µm jusqu'à 10µm vers le centre de la zone active, on arrive à réduire la température graduellement jusqu'au centre de la zone active, ce qui nous permet d'avoir une zone active beaucoup plus homogène avec un écart de température dans le centre de la spirale de seulement quelques degrés C° en plus. Dans un deuxième temps, une étude optimisée sur le GAP (distance entre le substrat (SI) et la membrane (SiO₂) a été faite, pour définir le GAP idéal au bon fonctionnement du capteur. Finalement, et après avoir résolu le problème de l'homogénéité, on rajoute les capteurs (les électrodes de mesures) dans la même surface du heater (entre les pistes), ce processus nous permet de gagner en coût une couche de gravure, contrairement à la plupart des autres designs de capteurs sur le marché qui consacrent une autre couche de gravure pour rajouter les capteurs.

Principe du capteur de gaz MOX :

L'adsorption de gaz ou les réactions à la surface induisent un changement dans les états des pièges à électrons. Ensuite, la variation des états des pièges entraîne une modification de la conductivité à travers la fonction de transducteur des capteurs [28]. Le principe d'un capteur de gaz semi-conducteur est basé sur l'adsorption d'une substance gazeuse par la surface d'une couche sensible conduisant à une modification de la résistance électrique de cette couche. Pour une meilleure détection, les capteurs de gaz nécessitent une température élevée. Par conséquent, le chauffage est très important. Son rôle est de maintenir la couche sensible à des températures élevées.

Modélisation électrothermique :

L'équation qui régit le transfert de chaleur par effet joule est :

$$Q = \rho C_p \frac{dT}{dt} - \Delta(k \cdot \Delta T) \quad (1)$$

Où :

Q : flux de chaleur (W/m³),

C_p : capacité calorifique à pression constante (J/kg. K),

T : température (K),

ρ : masse Volumique (kg/m³),

K : conductivité thermique (W/m. K).

La chaleur résistive générée Q est proportionnelle au carré de l'amplitude de la densité de courant électrique de densité de courant J qui est à son tour proportionnelle au champ électrique, ce qui correspond à la forme négative de la pente du potentiel V , nous avons donc :

$$Q = \rho |J^2| \quad (2)$$

En utilisant la relation (3) entre la densité de courant et le champ électrique

$$J = \sigma(T)E \quad (3)$$

En remplaçant l'expression de la densité de courant dans l'équation (2), et sachant que le champ dérive d'un potentiel, nous obtenons :

$$Q = \sigma |\nabla V^2| \quad (4)$$

$$Q = \frac{1}{\sigma} |J^2| = \frac{1}{\sigma} |\sigma E|^2 = \sigma |\Delta V|^2 \quad (5)$$

Avec σ qui est donnée par :

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{1 + \alpha(T - T_0)} \quad (6)$$

Dans cette étude, nous effectuerons des analyses de transfert de chaleur en régime permanent. Les prochaines étapes sont la conception de la géométrie, la sélection des matériaux (le platine a été utilisé dans cette étude) et l'ajout de conditions aux limites. Pour ces dernières, une tension sera appliquée à une extrémité de l'électrode de chauffage et l'autre extrémité sera mise à la terre avec une isolation électrique pour le reste du modèle. De plus, les conditions suivantes ont été choisies : un coefficient de convection sous la membrane diélectrique, $h = 62,5 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ K})$; un coefficient de convection sur la membrane diélectrique, $h = 125 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{ K})$; et une isolation thermique sur le reste du modèle. Des valeurs similaires ont également été utilisées dans la littérature [29, 30]. Pour minimiser les erreurs de modélisation, le maillage est une étape importante dans la simulation [31]. Après ces étapes, des simulations seront effectuées. Des géométries différentes seront testées et comparées pour obtenir de meilleurs résultats. Les propriétés matérielles sont nécessaires pour résoudre les équations mathématiques. Le tableau 1 énumère les propriétés matérielles de SiO2 et de Pt.

Material	Density ρ_v ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Heat capacity at constant pressure C_p ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Thermal conductivity k ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Electric resistivity ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)
Si	2330	702	148,0	$3,0 \cdot 10^8$
SiO ₂	2270	1000	1,4	$1,0 \cdot 10^{13}$
Poly-Si	3280	700	180,0	$1,5 \cdot 10^{-05}$
Pt	21440	132	73,0	$3,4 \cdot 10^{-07}$

Tableau 1. Propriétés des matériaux utilisés dans la simulation [1].

Design du heater:

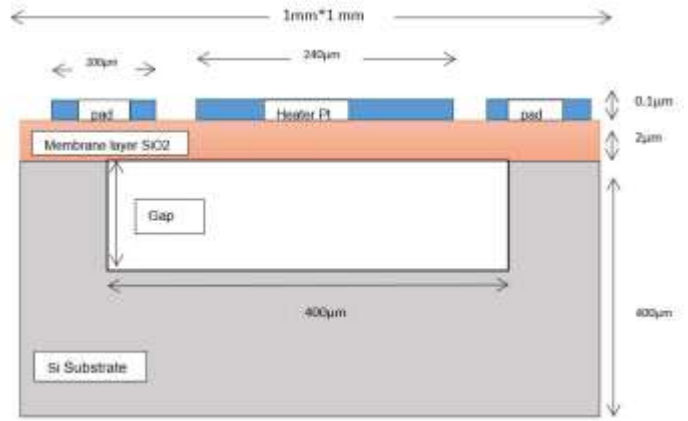


Figure 1. Les couches du capteur de gaz.

La figure 1 présente différentes couches constituant le capteur de gaz. Pour atteindre l'uniformité de température souhaitée et la performance globale du capteur, la conception de l'élément chauffant est d'une grande importance. Par conséquent, la géométrie et le matériau de l'élément chauffant doivent être choisis avec soin pour atteindre une distribution uniforme de la température sur la surface du heater. Le platine a été utilisé comme élément chauffant avec une épaisseur de 0,1 μm . Le film chauffant était supporté par une membrane de taille 1 \times 1 mm. En fait, la membrane est utilisée comme isolateur électrique à haute température pour obtenir une répartition uniforme de la chaleur sur la géométrie. Cette membrane a été conçue pour être très mince (0,2 μm) afin de réduire les pertes par conduction, puisque l'épaisseur de la membrane affecte directement les performances du heater. Le choix du matériau du micro-réchauffeur est déterminé par une plage de température de fonctionnement adaptée aux besoins, et bonne homogénéité sur la surface active. Le platine (Pt) présente divers avantages tels qu'une densité plus faible, une bonne capacité calorifique spécifique, conductivité électrique élevée, etc. Il s'agit également d'un métal de transition dense, malléable, ductile, précieux, gris-blanc. Ainsi, il est le métal le moins réactif. Il a également une très bonne chaleur spécifique et propriétés de chauffage. En réduisant les dimensions de la géométrie, une température plus élevée peut-être atteinte.

Etude du heater :

1- Étude des différentes géométries du heater

Une étude comparative a été faite pour trois forme de géométries du heater en utilisant la méthode des éléments finis, notre choix de ces trois configurations a été fait en se basant sur une recherche dans la littérature sur les types de géométries les plus souvent utilisés comme heaters dans les capteurs de gaz SMO, afin de nous aider dans le choix de notre modèle qu'on va adopter par la suite et l'améliorer encore plus. Cette étude nous permet aussi de valider notre modèle, ainsi que de créer un design qui donne un compromis entre un maximum d'uniformité de la chaleur au niveau de la couche sensible et entre une puissance consommé réduite. La figures (a) (b) (c) ci-dessous représente la distribution de la chaleur pour les trois configurations utilisées.

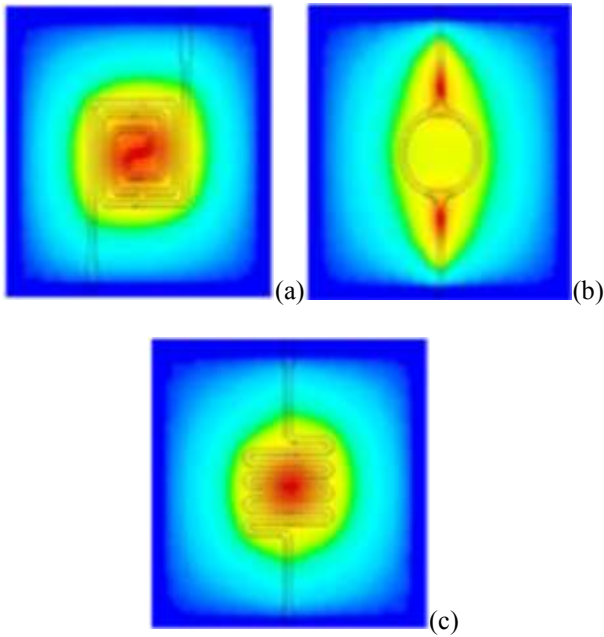


Figure 2. Distribution de la chaleur pour géométries (a-Spirale, b-anneau, c-méandre).

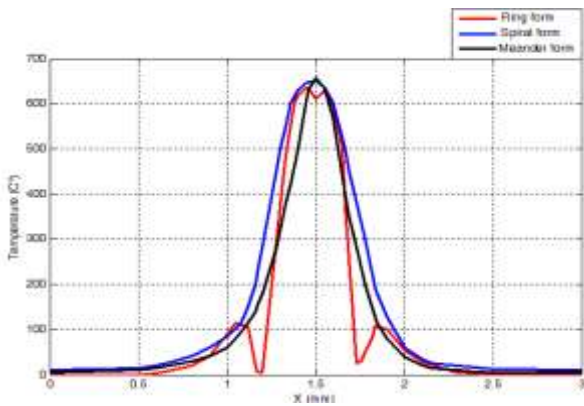


Figure 3. Profil thermique en fonction des formes du heater.

La figure au-dessus représente une comparaison de la distribution de la chaleur entre les trois géométries méandre, anneau et spirale. Les trois courbes atteignent facilement les 600°C pour une alimentation des contacts de heater de 2V. la température est très élevée puisqu'on n'a pas encore apporté les modifications sur la géométrie (membrane, substrat, heater) qui feront baisser cette température, ça sera dans la suite de ce papier, mais le but de cette étude et de déterminer la forme qui donne le meilleur compromis homogénéité-puissance consommée. On constate que la forme qui donne la meilleure homogénéité est la forme anneau suivie par la forme spirale et ensuite le méandre.

- On note que l'écart de température entre les extrémités des pistes dans la zone active du heater est très élevé pour ces modèles (plus de 200°C)

Nous allons résoudre ce problème d'écart dans la deuxième partie de ce papier.

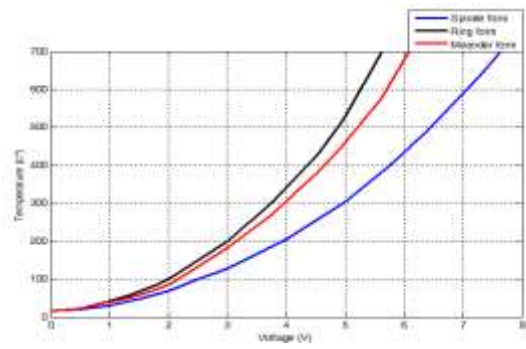


Figure 4. Température en fonction de la tension électrique.

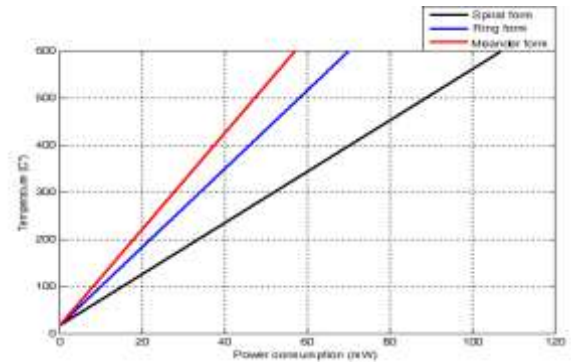


Figure 5. Température en fonction de la puissance électrique.

Dans la figure ci-dessus, nous représentons la température en fonction de la puissance consommée, la forme spirale l'emporte avec une puissance de 45mw aux alentours de 300°C.

Discussions :

➤ Résultats obtenus pour une forme méandre, spirale et anneau :

	Homogénéité	Puissance consommée
Méandre	+	-
Spirale	++	++
Anneau	-	+

- La forme anneau est la moins adaptée coté homogénéité, par contre la puissance consommée est réduite.
- La forme méandre est la mieux adaptée coté homogénéité, par contre la réduction de puissance consommée est remarquable.
- La forme spirale est la mieux adaptée coté homogénéité et puissance consommée.

2- Etude comparative sur les couches sensibles

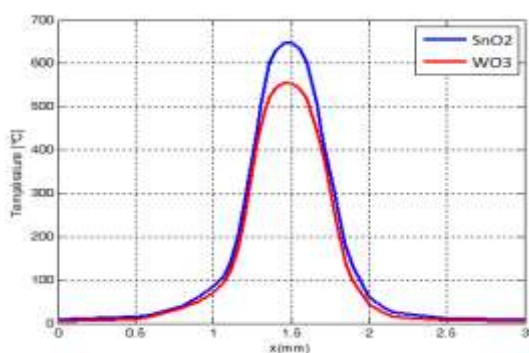


Figure 6. Profil thermique pour les deux couches sensibles.

Selon la littérature, la température de fonctionnement de WO₃ est comprise entre 250°C et 400°C, tandis que la SnO₂ est comprise entre 350°C et 500°C. La figure ci-dessus montre une comparaison entre l'utilisation de SnO₂ et WO₃ comme couche sensible pour la même alimentation du heater qui est de 2V, nous trouvons que la température est plus intéressante (640 °C) dans le cas du SnO₂ quand nous avons atteint 560°C en utilisant WO₃, ça s'explique par la différence de température de fonctionnement pour chaque couche sensible et selon le gaz à détecté aussi.

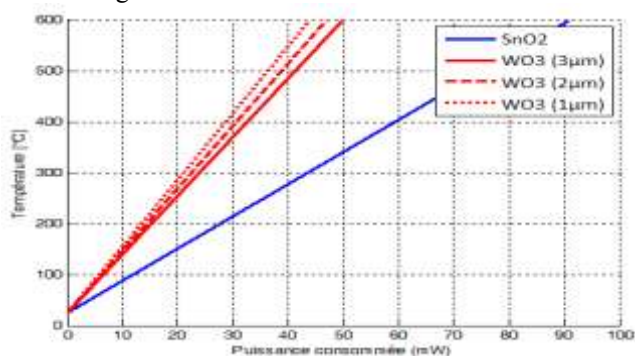


Figure 7. Température en fonction de la puissance consommée.

Dans la figure ci-dessus, nous voyons que pour WO₃, la consommation d'énergie de fonctionnement est comprise entre 17 et 30 mW, tandis que pour la consommation d'énergie SnO₂ est comprise entre 40 et 65 mW.

- La réduction de l'épaisseur de la couche sensible entraîne une minimisation de la consommation d'énergie.

Trois modèles différents de heaters qui sont la spirale, le méandre et l'anneau ont été simulés ; il a été constaté que la forme en spirale est la plus appropriée, en termes d'uniformité de température et de consommation d'énergie. La forme en spirale a été utilisée après l'introduction de l'oxyde d'étain SnO₂ en tant que couche sensible, et l'oxyde de tungstène WO₃ ensuite et les résultats sont comparés.

Etude des paramètres géométriques :

1-Différentes largeurs des pistes du heater

Le choix de notre design du heater pour la suite était la forme spirale puisqu'elle fournit un bon compromis entre une bonne

homogénéité de la température ainsi qu'une faible puissance consommée, et aussi pour éviter les contraintes thermiques dans les angles des pistes du heater. Une nouvelle forme de membrane a été utilisée dans le cadre de la conception formée par 8 micro-ponts afin de fournir une meilleure isolation contre les pertes de chaleur de l'appareil de chauffage au substrat. Il en résulte une minimisation de la dissipation thermique et une réduction de la consommation d'énergie jusqu'à quelques mW.

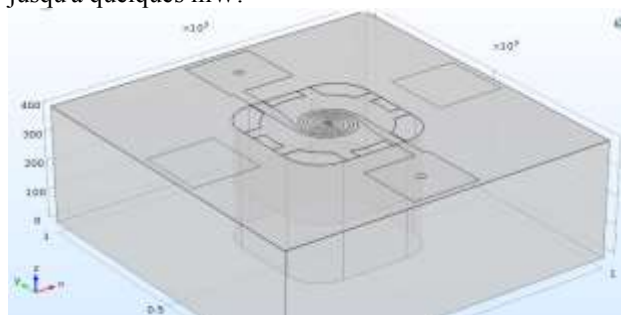


Figure 8. Design sous Comsol sans les électrodes de mesure.

Pour éviter les contraintes thermiques dans les angles des pistes du heater, nous avons d'abord utilisé la forme spirale circulaire comme design avec une largeur de pistes de 10 µm, pareillement entre les pistes. Ensuite, et dans le but d'améliorer l'homogénéité de notre capteur nous avons modifié la largeur des pistes du heater graduellement à partir du centre de ce dernier. Une étude d'optimisation a été faite pour la meilleure homogénéité possible. Les figures suivantes représentent la comparaison des résultats obtenus de la distribution de la chaleur en élargissant les distances entre les pistes graduellement comme montré dans la figure ci-dessous ;

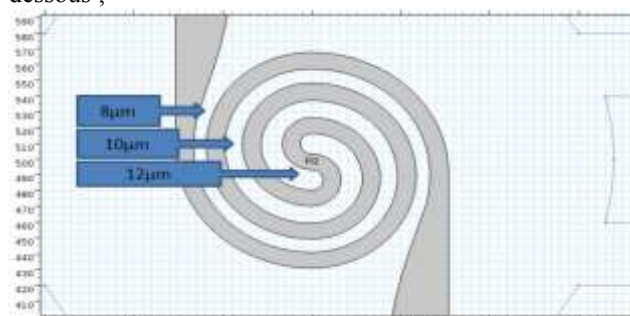


Figure 9. Modification de la largeur des pistes du heater

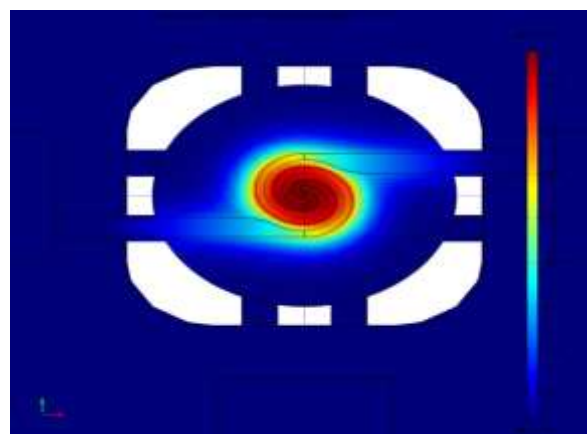


Figure 10. Température dans notre capteur sous Comsol.

Les modifications apportées dans le design du capteur par rapport au modèle précédent (figure 4-a) sont les suivants :

- Rajout d'une gravure sous la membrane avec des ponts pour relier les pistes du heater aux pads pour minimiser la chaleur engendrée par le substrat.
- Opter pour la forme spirale circulaire au lieu de la rectangulaire pour éviter les contraintes thermiques sur les coins des pistes.
- Arrondir les connexions du heater de façon graduelle pour la fluidité du courant qui arrive vers la zone active à partir des pads.

Ces modifications nous ont permis de gagner 200°C de moins en température, et aussi de gagné une homogénéité importante dans la zone active par rapport au modèle précédent (figure 2,3-spirale).

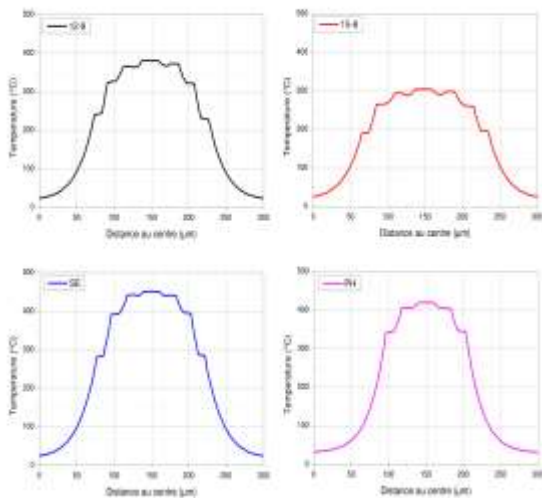


Figure 11. La température en fonction des distances entre pistes du heater.

- La courbe en noir (12-8) représente l'élargissement graduel entre les pistes du heater en allant de 12µm à 8µm.
- La courbe en rouge (15-8) la distance élargie graduellement de 15µm à 8µm.
- La courbe en bleu (SE) Sans Élargissement (distances entre les pistes=10µm et la largeur des pistes et aussi a 10µm).
- La courbe en magenta (PH) les Sorties de Pads sont Horizontaux sans aucun élargissement entre les pistes du heater (distances entre les pistes=10µm et la largeur des pistes est aussi a 10µm).

Avec la configuration 15µm à 8µm on obtient de meilleurs résultats par rapport aux autres configurations.

- On note que les modifications apportées sur le design du capteur jusqu'ici (figure 11 courbe 15-18) nous ont permis de réduire l'écart de la température de 100°C de plus entre les extrémités des pistes dans la zone active du heater par rapport au modèle initial (figure 2,3-spirale) ce qui nous permis de gagner énormément en homogénéité dans la zone active dans le but de récupérer un signal de capteur avec le moins de bruit possible, ce qui améliore la fiabilité de notre capteur.

2-Etude sur les dimensions d'ellipse dans le centre

Avec l'idée d'élargir la distance entre les pistes du heater, on a gagné plus d'homogénéité au niveau de la zone active du

heater, mais il reste quand même un écart de température au niveau du centre, pour résoudre ce problème on a procédé à une modification du centre des pistes de l'élément chauffant en remplaçant les deux demi-cercles par une ellipse comme représenté dans la figure suivante :

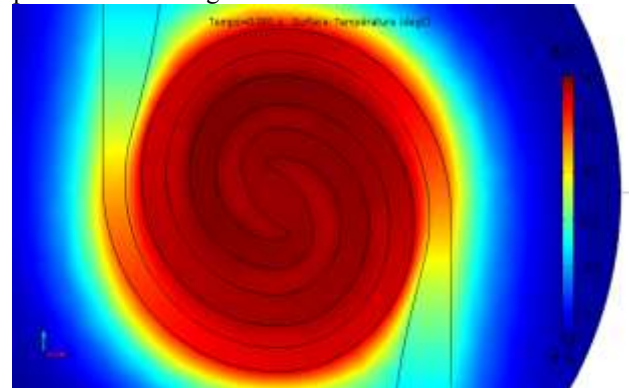


Figure12. Distribution de la chaleur avec l'ellipse au centre.

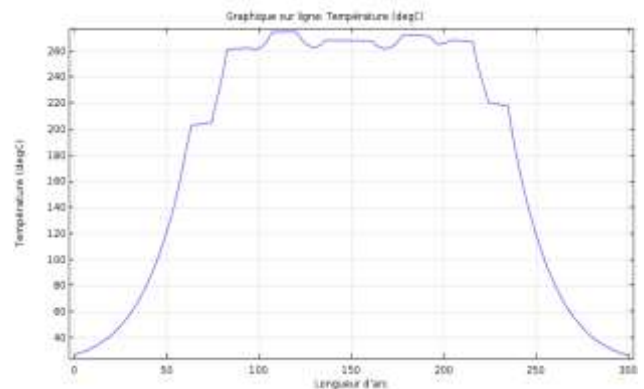


Figure13. Profil thermique avec l'ellipse au centre.

- Les modifications apportées sur le design du capteur jusqu'ici (figure 12-13) nous ont permis d'avoir un écart de température plus réduit (40°C à 60°C) entre les extrémités des pistes dans la zone active du heater par rapport au modèle Précédent (figure 11 courbe 15-18).

Malgré cette amélioration, l'écart de la température au centre du heater est encore important, pour résoudre cela, on a procédé à la modification du centre du heater en remplaçant les deux demi-cercles par une ellipse comme représenté dans les figures suivantes. Pour atteindre un meilleur rendement de notre capteur il faut que le courant qui circule dans le heater soit homogène, pour cela il faut garder la même largeur de pistes ce qui ne s'applique pas sur le cas d'ellipse, donc nous avons rajouté un trou dans ce dernier d'une façon que le courant qui circule soit stable dans tout le long du heater comme le montre la figure suivante :

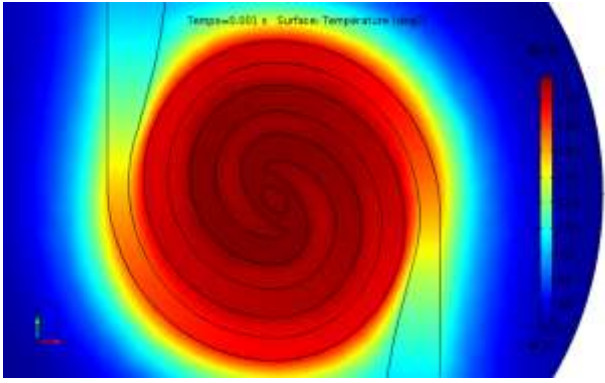


Figure14. Distribution de la chaleur avec l'ellipse et le trou au centre

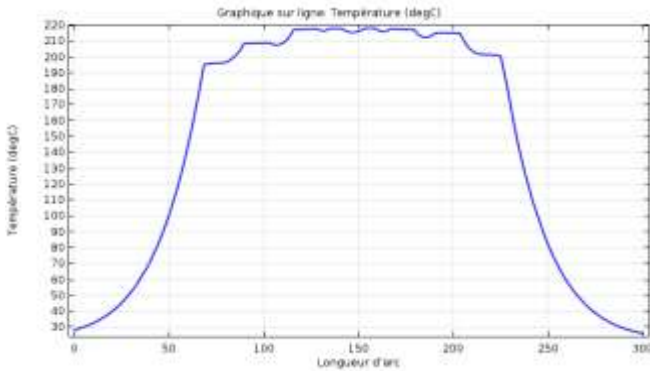


Figure15. Profile thermique avec l'ellipse au centre plus le trou.

En comparant les figures (figure 2,3-spirale, avec la figure 11 courbe 15-18, Et la figure 12-13), on constate vraiment l'amélioration de l'homogénéité de la température par rapport au heater avec l'ellipse seule ou encore plus par rapport au heater avec les deux demi cercles.

- L'écart de la température passe de 200°C (modèle initiale) à 20°C, ce qui est très satisfaisant comme résultat.

3-étude du substrat (Si) en fonction de la profondeur du Gap :

Le gap représente le vide entre le substrat du silicium et la membrane, le but de cette étude est de voir l'influence du changement de volume du gap sur la distribution de la température au niveau de la membrane.

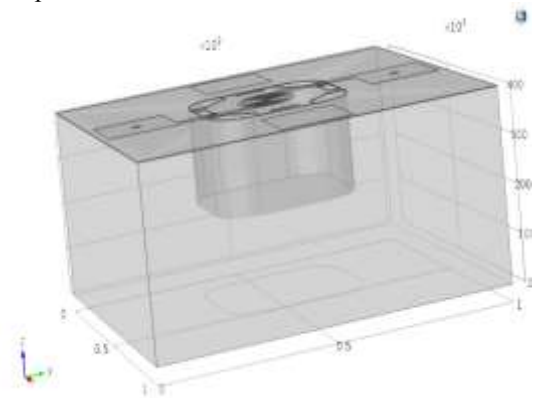


Figure16. Représentation du gap sous Comsol.

On a varié le gap selon Z (verticalement) comme montre les courbes suivantes :

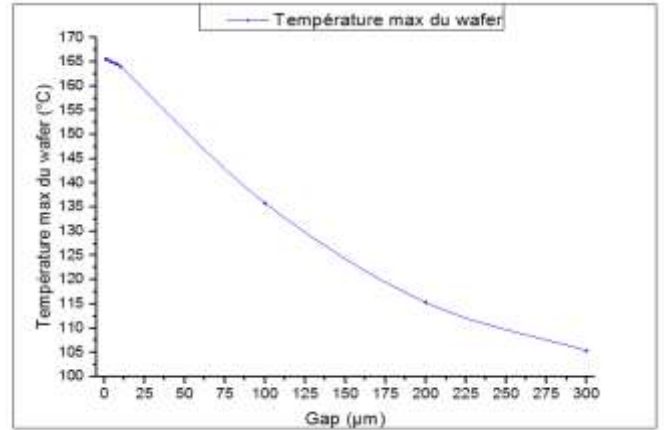


Figure17. Gap en fonction de la Tmax du substrat Si (wafer).

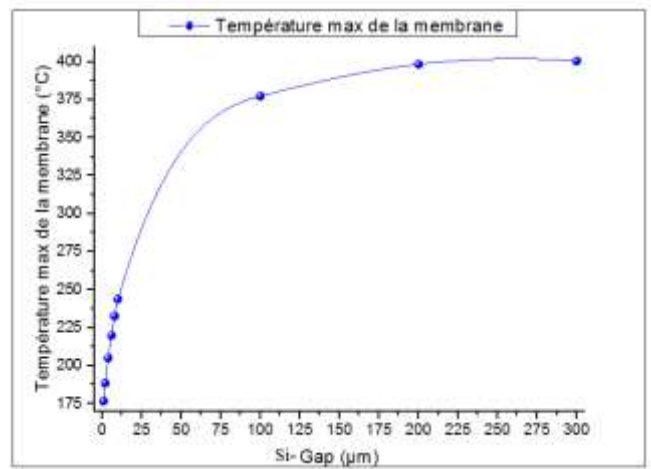


Figure18. Si-gap en fonction de Tmax de la membrane.

Si-gap représente le volume de la couche du silicium gravée sous la membrane avec des gaps qui commencent de 300µm (ou Si-gap = 0µm) Jusqu'au : gap= 0µm (Si-gap= 300µm). On sait que chaque couche sensible a sa propre température de fonctionnement pour chaque gaz. Si on arrive à contrôler la température de la puce on peut aussi contrôler la température de fonctionnement, et faire en sorte que le capteur soit le plus sélectif possible pour chaque gaz.

Dans cette étude on constate que plus la couche de silicium est proche de la membrane plus la température est élevée au niveau de capteur, cette étude est très importante parce qu'elle nous permet de modifier la température atteinte par le capteur en jouant sur la gravure du substrat.

L'ajout des électrodes sensibles (les capteurs) :

Après avoir étudié les différents aspects d'influence sur l'homogénéité de notre heater, on peut finalement ajouter les électrodes de mesures (les capteurs) dans le même niveau du heater.

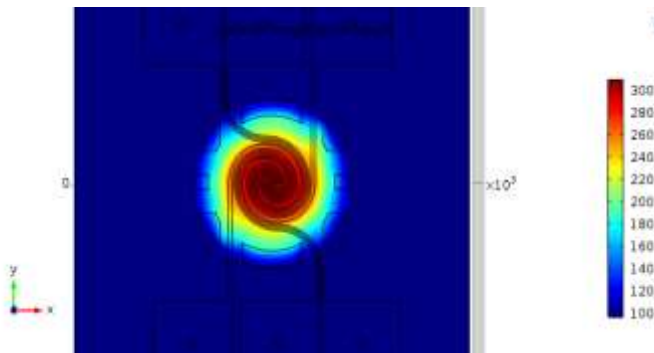


Figure 19. Distribution de la chaleur dans le capteur1 avec deux électrodes de mesures sous Comsol

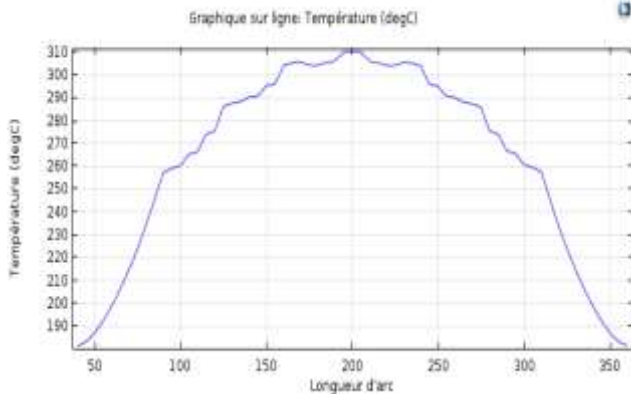


Figure 20. Profile thermique avec le rajout des capteurs (électrodes).

Conclusion

Dans ce papier, notre travail principal a donc consisté à simuler plusieurs solutions pour améliorer l'homogénéité de la température assurée par l'élément chauffant, tout en miniaturisant la géométrie du capteur, et à développer un nouveau design qui minimise la consommation de puissance par rapport aux capteurs de la littérature. Ce travail a été réalisé sous le logiciel de simulation COMSOL Multiphysics. Plusieurs simulations ont été faites pour garder la meilleure homogénéité tout le long de zone active de notre capteur de gaz des études sur le design, la profondeur du gap, les différents phénomènes qui régissent le capteur, sur le design de la membrane, également sur la piste du heater et les électrodes de mesures. Nous avons proposé une nouvelle conception de capteurs de gaz à oxyde métallique semi-conducteur qui mettent en œuvre plusieurs aspects innovants afin de réduire davantage la consommation d'énergie globale, tout en améliorant l'uniformité thermique dans la zone active et le déplacement de la membrane du dispositif pendant le fonctionnement. La conception de notre capteur rassemble le heater et les capteurs (électrodes de mesures) dans la même couche de gravure, ce qui permet d'améliorer la capacité de détection et de réduire le temps et le coût de fabrication. Notre capteur assure une distribution de température très uniforme, cela est dû à plusieurs modifications et améliorations qu'on a apportées sur le design initial, ça permet aussi de réduire au minimum la consommation d'énergie, qui est d'environ de quelques mW au niveau du design final, lorsque le heater est chauffé à 300 ° C. Pour soutenir davantage les simulations rigoureuses, nous avons commencé ce travail par faire des comparaisons entre les géométries les plus souvent utilisés dans la littérature récente. Les caractéristiques des capteurs présentées et discutées dans ce manuscrit permettent de nouvelles applications pour les capteurs de gaz SMO, tels que

les systèmes de nez électroniques et les dispositifs portables utilisés pour la surveillance de la qualité de l'air et des aliments. Les deux capteurs peuvent être fabriqués en utilisant la technologie MEMS conventionnelle, ce qui les rend plus efficaces à long terme.

Références

- N. DUFOUR, Conception and realisation d'un multicapteur de gaz intégré a base plateforme chauffante sur silicium et de couches sensibles à oxydes metalique pour le controle de l'air habitacle " 2014, LAAS, UT3 FRANCE.
- Mailly, F.; Giani, A.; Bonnot, R.; Temple-Boyer, P.; Pascal-Delannoy, F.; Foucaran, A.; Boyer, A. Anemometer with hot platinum thin film. *Sens. Actuat. A* 2001, 94, 32-38.
- Dai, C.L. A capacitive humidity sensor integrated with micro heater and ring oscillator circuit fabricated by CMOS-MEMS technique. *Sens. Actuat. B* 2007, 122, 375-380.
- Kalantar-Zadeh, Kouros, et al." Intestinal gas capsules: A proof-of-concept demonstration." *Gastroenterology* 150.1 (2016): 37-39.
- Abad, Estefania, et al." Flexible tag microlab development: gas sensors integration in RFID flexible tags for food logistic." *Sensors and Actuators B: Chemical* 127.1 (2007): 2-7.
- TGS 8100 {for the detection of Air Contaminants, FIGARO USA, Inc., Arlington Heights, USA (online: <http://www.figarosensor.com/products/entry/tgs8100.html>).
- CCS801 {Ultra-Low Power Analog VOC Sensor for Indoor Air Quality Monitoring, AMS AG, Unterpremstatten, Austria (online:<http://ams.com/eng/Products/Environmental-Sensors/Gas-Sensors>).
- SGP30 {Sensirion Gas Platform, Sensirion, Staefa, Switzerland (online:<https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/gas-sensors/>).
- 2017 Annual Creativity in Electronics Awards Announces Finalists from Leading Companies, Design Teams, and Executives in the Electronics Industry (online:<http://ubmtech.mediaroom.com/index.php?s=17177&item=138045>).
- G. Velmathi, N. Ramshanker, S. Mohan, Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference, India, Oct. 29–30 (2010).
- Hsieh, T. M., Luo, C. H., Huang, F. C., Wang, J. H., Chien, L. J. and Lee, G. B., 2008, "Enhancement of Thermal Uniformity for a Microthermal Cycler and Its Application for Polymerase Chain Reaction," *Sensors and Actuators, B: Chemical* 130(2), 848–856. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.10.063>
- L. Sujatha, V.S. Selvakumar, S. Aravind, R. Padamapriya, B. Preethi, Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference, Bangalore, (2012).
- A. Botau, D. Bonfert, C. Negrea, P. Svasta, C. Ionescu, Electro-Thermal Analysis of Flexible Micro-Heater, 38th International Spring Seminar on Electronics Technology. <https://doi.org/10.1109/isse.2015.7248022>
- Pandya, H. J., Sudhir Chandra, and Vyas, A. L., 2012, "Integration of ZnO Nanostructures with MEMS for Ethanol Sensor." *Sensors and Actuators, B: Chemical* 161(1), 923–28. <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2011.11.063>
- Kim, Y. S., 2006, "Microheater-Integrated Single Gas Sensor Array Chip Fabricated on Flexible Polyimide Substrate," *Sensors and Actuators, B: Chemical* 114(1), 410–417. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.06.016>
- Das, S., Akhtar, J., 2014, «Comparative Study on Temperature Coefficient of Resistance (TCR) of the E-beam and Sputter Deposited Nichrome Thin Film for Precise Temperature Control of Microheater for MEMS Gas Sensor, » In: Jain, V., Verma, A. (eds) *Physics of Semiconductor Devices*. Environmental Science and Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03002-9_124016
- Guan, T. and Puers, R., 2010, "Thermal Analysis of a Ag/Ti Based Microheater," *Procedia Engineering* 5, 1356–1359. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2010.09.366>
- Santra, S., Udrea, F., Guha, P. K., Ali, S. Z., and Haneef, I., 2010, "Ultra-High Temperature (>300 °C) Suspended Thermodiode in SOI CMOS Technology," *Microelectronics Journal* 41(9), 540–46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mejo.2009.12.005>

- H. Kumar, K.K. Sing, N. Sood, A. Kumar, R.K. Mittal, *Sens. Appl. Symp.* (2014). <https://doi.org/10.1109/SAS.2014.6798942>
17. K.G. Girija, D. Kaur, V. Belwanshi, J. Mehta, R.K. Vatsa, A. Topkar, *Proceedings of the 2015 2nd International Symposium on Physics and Technology of Sensors, Pune, India (2015)*.
<https://doi.org/10.1109/ispts.2015.7220075>
- P. Menini, "Du capteur de gaz à oxydes métalliques vers les nez électroniques sans fil," Ph.D. dissertation, Paul Sabatier University, France, 2012.
- Ortel, Marlis, Yulia Sergeeva Trostyanskaya, and Veit Wagner." Spray pyrolysis of ZnO TFTs utilizing a perfume atomizer." *Solid-State Electronics* 86 (2013): 22-26.
- Prasad, Mahanth, Vineet Sahula, and Vinod Kumar Khanna." Design and fabrication of Si-diaphragm, ZnO piezoelectric film-based MEMS acoustic sensor using SOI wafers." *IEEE transactions on semiconductor manufacturing* 26.2 (2013): 233-241.
- Patil, G. E., et al." Spray pyrolysis deposition of nanostructured tin oxide thin films." *ISRN Nanotechnology* 2012 (2012).
- Bouaoud, A., et al." Transparent conducting properties of Ni doped zinc oxide thin films prepared by a facile spray pyrolysis technique using perfume atomizer." *Materials Chemistry and Physics* 137.3 (2013): 843-847.
- Li, E., et al." Indium oxide with novel morphology: synthesis and application in C₂H₅OH gas sensing." *Crystal Growth and Design* 9.5 (2009): 2146-2151.
- Rani, Rozina Abdul, et al." Nanoporous Nb₂O₅ hydrogen gas sensor." *Sensors and Actuators B: Chemical* 176 (2013): 149-156.
- H. Zhongqiu, Ph.D. Thesis, Department of Molecular and Material Sciences Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University (2014).
- H. Chalabi, Ph.D. Dissertation, University Paul Cézanne, Tunisian, p. 60 (2007).
- P. Yoboue, Ph.D. Dissertation, University Toulouse, French, p. 60 (2010).
- N. Petra, J. Zweck, S.E. Minkof, A.A. Kosterev, J.H. Doty, *SIAM J. Appl. Math.* (2011).
<https://doi.org/10.1137/100807181>