

Capteur micro-onde de radiation nucléaire passif sans fil optimisé

C. Arenas, J. Philippe, A. Rumeau, H. Aubert, P. Pons

LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, INP, Toulouse, France

Résumé – Un capteur de radiation nucléaire sans fil et sans batterie est présenté. Celui-ci est basé sur la modification de la fréquence de résonance d'un résonateur micro-onde planaire par le déplacement d'une micro-membrane de silicium soumise à une surpression. Celle-ci est générée lors de l'irradiation par le dégazage d'un film de polyéthylène. Les différentes causes de non reproductibilité de la sensibilité aux radiations nucléaires sont analysées. Une nouvelle solution technologique est proposée pour simplifier la fabrication grâce à une interconnexion par iris de couplage.

1. Introduction

Le principe de fonctionnement du capteur présenté est basé sur le couplage d'un capteur de pression à transduction électromagnétique (autour de 24GHz) [1] avec une micro-cavité contenant du PolyÉthylène (PE) (Figure 1). Sous l'action des radiations nucléaires, le PE libère principalement de l'hydrogène et génère ainsi une surpression ΔP dans la microcavité. Cette surpression engendre alors la déflexion d'une membrane de silicium qui se rapproche ainsi du résonateur RF planaire et modifie de ce fait sa fréquence de résonance.

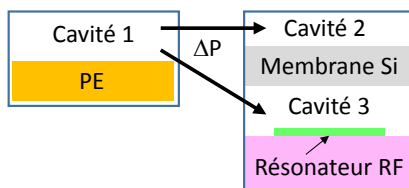


Figure 1. Synoptique du capteur.

Afin de pouvoir accéder facilement aux sorties micro-ondes du résonateur, les premiers capteurs ont été fabriqués en connectant la cavité 1 à la cavité 2 (Figure 1) [2-3]. Le capteur est alors constitué d'une plaque de silicium micro-usinée soudée à deux plaques de verre (Figure 2). Pour assurer à la fois une surpression et une variation de fréquence de résonance du résonateur suffisante, il est nécessaire d'obtenir respectivement :

- un rapport volume de PE / volume de cavité le plus proche possible de l'unité.
- une distance membrane de silicium / résonateur micro-onde inférieure à 10 μ m.

Cette double contrainte peut être assurée en réalisant une membrane de silicium d'épaisseur non uniforme comprenant un plot non usiné en son centre (Figure 3).

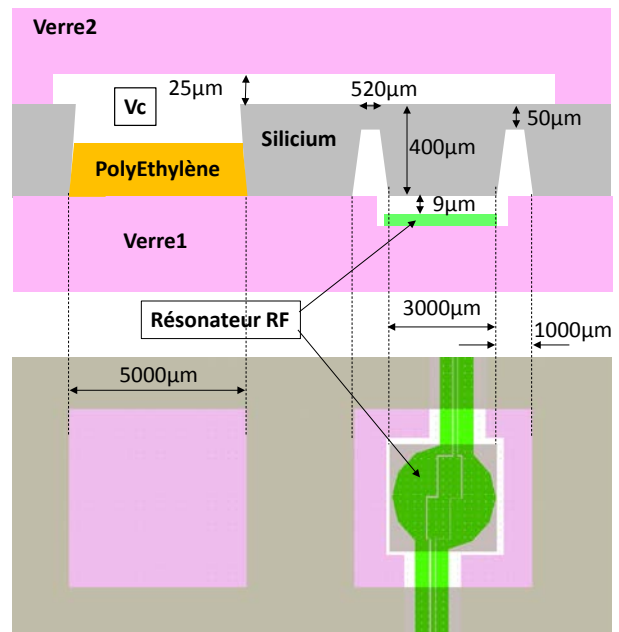


Figure 2. Vue en coupe (dessus) et dessin des masques (dessous) du capteur

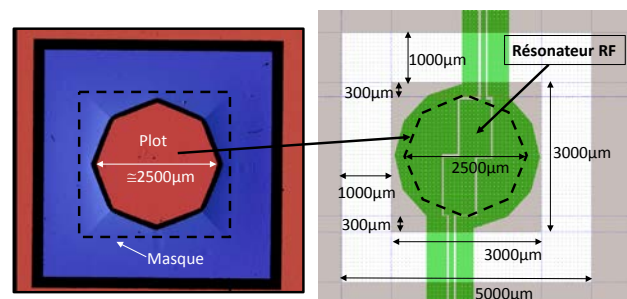


Figure 3. Photo de la membrane (gauche) et dessin des masques (droite)

2. Analyse des résultats

Les fréquences de résonance du résonateur micro-onde ont été extraites à partir de la mesure du coefficient de réflexion du résonateur avant et après irradiation (20kGy) avec un canon à électron à 6MeV (Tableau 1).

	N1	N2	N6	N7	N9
Fr ₀ (GHz)	26.423	26.447	26.541	26.509	26.474
ΔFr/Fr ₀ (%)	- 3	- 8.4	- 2.5	- 7.8	- 5.1

Tableau 1. Fréquence de résonance avant irradiation et sensibilité aux radiations (dose = 20kGy) pour plusieurs capteurs d'un même lot (Lot 21)

On peut noter de faibles variations (< 0.5%) de la fréquence de résonance avant irradiation ce qui témoigne une bonne reproductibilité technologique. Mais la sensibilité aux radiations est très variable avec un facteur supérieur à 3 pour les extrêmes. Plusieurs causes peuvent être à l'origine de ces dispersions :

1) La non herméticité de la cavité contenant le PE.

Dans ce cas la perte de pression dans la cavité peut varier d'un capteur à l'autre. Cette cause a été écartée suite à des études d'herméticité sur le long terme [4].

2) La non reproductibilité du comportement mécanique de la membrane de silicium.

La membrane de silicium est d'épaisseur non uniforme avec un plot central non gravé en son centre (Figure 2 et Figure 3). Ce type de membrane présente par ailleurs l'avantage d'avoir un déplacement du plot parallèle au résonateur lorsqu'une pression est appliquée et améliore ainsi la sensibilité du capteur. Les raisons qui peuvent modifier le comportement mécanique de la membrane ou son impact sur la fréquence de résonance du résonateur sont les suivantes :

- l'épaisseur de la zone amincie de la membrane est très différente de celle attendue. Les mesures ont cependant montré des écarts en épaisseurs inférieurs à 2% pour les différents capteurs.

- une surface de plot insuffisante par rapport à la surface du résonateur. A cause du type de gravure utilisée (gravure liquide au TMAH), la forme du plot est octogonale avec des dimensions inférieures à celles du masque mais également du résonateur (Figure 3). Des erreurs d'alignement peuvent ainsi introduire des modifications de la réponse du résonateur. Les simulations présentées sur la Figure 4 montrent cependant que les deux types de membranes ont des sensibilités comparables.

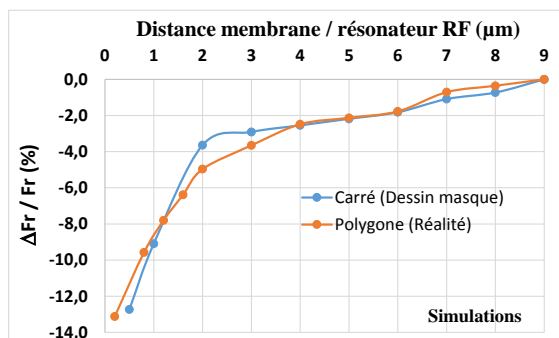


Figure 4. Variation de la fréquence de résonance en fonction du gap d'air pour 2 types de plot

- une inclinaison du plot qui peut être liée aux contraintes mécaniques et aux défauts de fabrication. Des analyses ont montré que des inclinaisons de quelques microns étaient présentes sur certains plots. Cette inclinaison peut avoir un impact important sur la sensibilité du capteur notamment lorsque la membrane est proche du résonateur, tout en n'introduisant pas une variation importante de la fréquence de résonance initiale. Comme le montrent les résultats de simulation présentés sur la Figure 5, la variation de fréquence de résonance peut être multipliée par un facteur supérieur à 2 avec un plot incliné de 2μm.

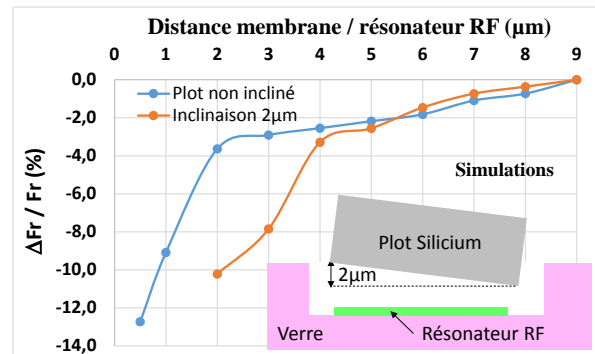


Figure 5. Variation de la fréquence de résonance Fr en fonction de la distance entre le résonateur planaire et la membrane de silicium avec un plot incliné ou non incliné

3 - La non reproductibilité des propriétés physico-chimiques du PE.

Des tests ont été réalisés pour analyser la nature des gaz produits par le PE lors de l'irradiation.

Un échantillon de PE est placé dans une ampoule en verre qui est ensuite scellée sous vide. Après irradiation, l'ampoule est placée dans une chambre à vide et est percée pour analyser les gaz présents dans l'ampoule à l'aide d'un spectromètre de masse (Figure 6). Il faut noter que les conditions de préparation, de mise en forme et d'irradiation du PE sont ici différentes de celles utilisées pour la fabrication des capteurs (Figure 7).

La Figure 8 donne le pourcentage de chaque gaz présent dans l'ampoule après irradiation. On peut noter que le dihydrogène est prépondérant dans l'ampoule après irradiation et que son taux augmente avec la dose mais que d'autres gaz sont présents avec des proportions relatives importantes (de 10% à 30%). Ceci peut s'expliquer par l'éventuelle « pollution » du PE qui libère ces gaz soit après scellement de l'ampoule soit lors de l'irradiation.

Pour les faibles doses utilisées dans le cas des capteurs (20kGy), la non reproductibilité des résultats obtenus pourrait alors s'expliquer par la « pollution » non contrôlée du PE qui génère une surpression nettement supérieure à celle provoquée par la libération de dihydrogène.

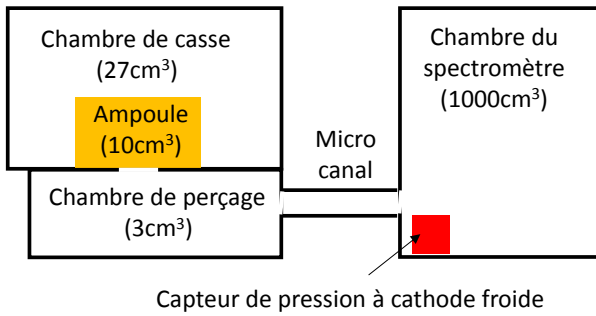


Figure 6. Dispositif d'analyse des gaz

	Capteurs	Ampoules
Recuit PE	300°C 1bar N2	300°C 1bar Ar
Scellement cavité	1bar N2 1200V	Vide
Irradiation canon électron	6MeV 0.1kGy/mn 20kGy	1MeV 5.7kGy/mn 11kGy, 47kGy, 118kGy

Figure 7. Condition de préparation et d'irradiation des échantillons

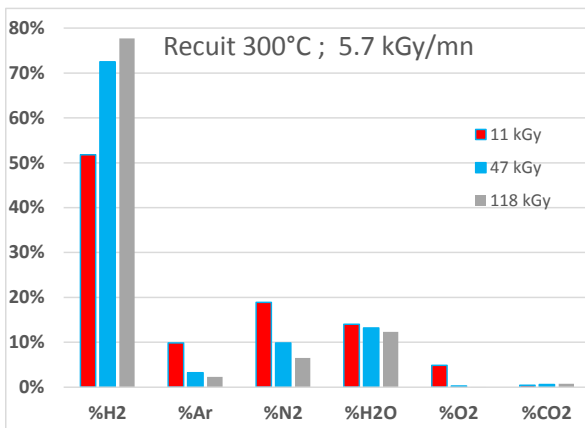


Figure 8. Pourcentage des différents gaz dans l'ampoule

3. Capteur à couplage par iris

Dans le but de simplifier le procédé technologique de fabrication des capteurs et de s'affranchir des problèmes liés à la réalisation des membranes d'épaisseur non uniformes, une nouvelle conception de capteur de pression est proposée (Figure 9). Celle-ci combine un résonateur micro-ruban (Figure 10) et une interconnexion par iris (Figure 11) qui permet de ne fabriquer qu'une seule cavité (cavité 1 reliée à la cavité 3, voir Figure 1).

La réponse du capteur de pression a été simulée en fonction de la distance [membrane silicium / résonateur] pour des déplacements de membranes uniformes. La Figure 12 et la Figure 13 présentent respectivement un exemple de réponse du capteur en fonction de la fréquence (pour une distance membrane / résonateur de

10µm) et la variation de la fréquence de résonance en fonction de la distance membrane / résonateur.

Les pertes d'insertion dans la bande d'intérêt (22.8GHz / 24.8GHz) sont inférieures à 2 dB.

La sensibilité du capteur diminue à mesure que la distance membrane / résonateur augmente. Elle est supérieure à 2%/µm pour des gaps d'air inférieurs à 2µm et elle est comprise entre 0.5% et 1% et pour des gaps d'air supérieurs à 2µm.

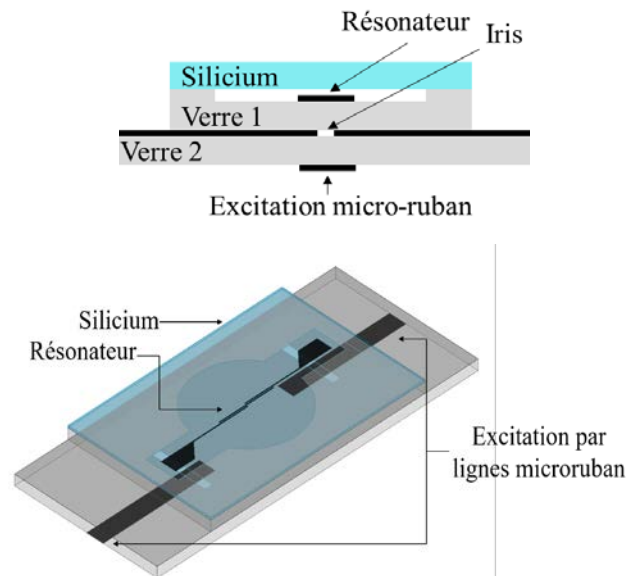


Figure 9. Nouvelle topologie de capteur micro-onde avec interconnexion par iris de couplage

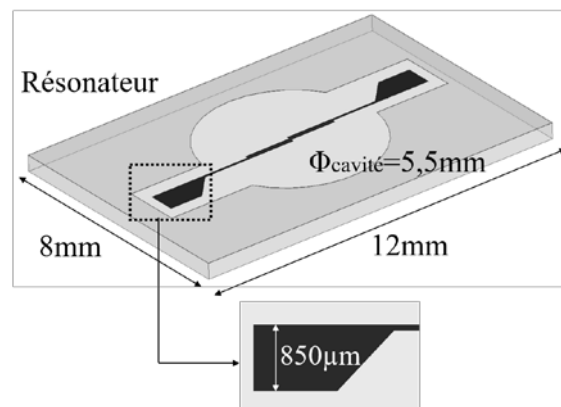
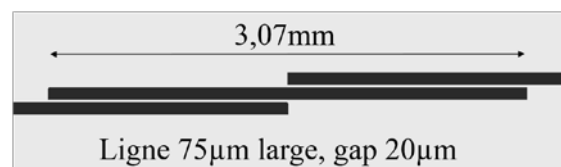


Figure 10. Dimensions de la conception du résonateur micro-ruban

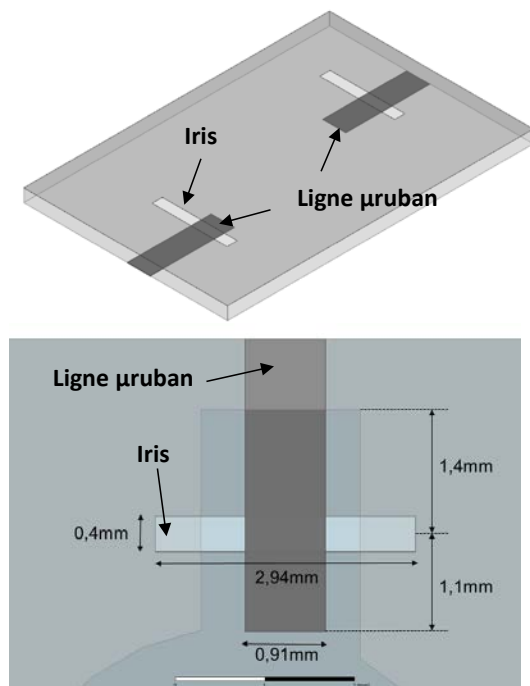


Figure 11. Design de l'interconnexion par iris de couplage

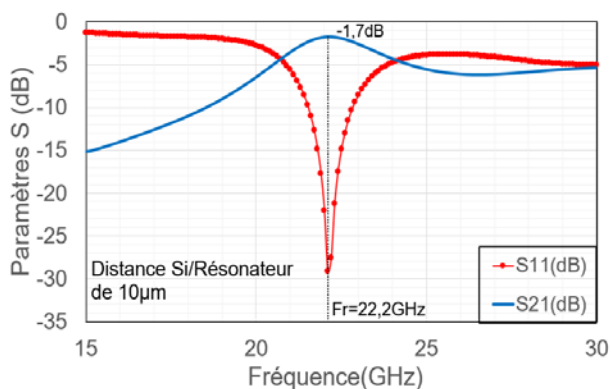


Figure 12. Paramètres S11 et S12 simulés du capteur en fonction de la fréquence

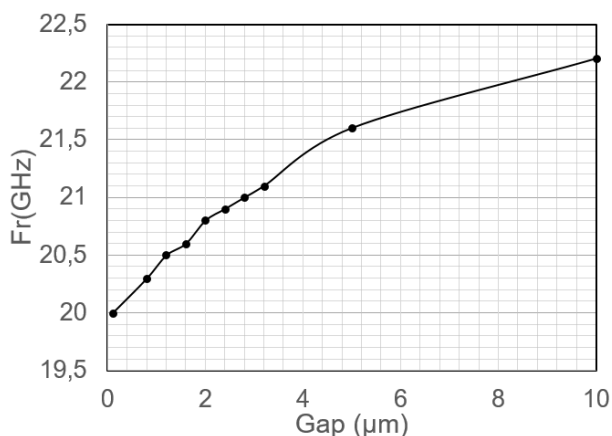


Figure 13. Fréquence de résonance F_r du capteur en fonction de la distance silicium / résonateur

4. Conclusions

Des analyses ont été réalisées sur les capteurs de radiation nucléaires préalablement fabriqués afin d'identifier les causes possibles pouvant expliquer la non-reproductibilité de leur sensibilité aux irradiations. Parmi les ces causes, deux principales ont été identifiées : un déplacement non uniforme de la membrane de silicium sous l'effet de la pression qui présente une zone non amincie en son centre et surtout une pollution du PE qui libère une quantité de gaz indésirables plus importante que le gaz attendu (le dihydrogène).

Afin de simplifier le procédé technologique de fabrication des capteurs et de s'affranchir des problèmes liés à la réalisation des membranes d'épaisseur non uniforme, une nouvelle topologie de capteur a été proposée. Celle-ci met en œuvre un capteur de pression en technologie micro-ruban et une interconnexion par iris de couplage. Les simulations électromagnétiques réalisées montrent que les pertes d'insertion sont acceptables ($< 2\text{dB}$) et que la sensibilité du capteur aux irradiations devrait être suffisante pour réaliser l'interrogation micro-onde à distance.

Les capteurs de pression sont en cours de fabrication et des mesures seront présentées lors de la conférence.

5. Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet FP7-MNT-ERA.NET-DOSIMEMS financé par l'UE et par la Région Occitanie et du projet CLE-CARANUC financé par la Région Occitanie. Ces travaux ont également été supportés par la plateforme technologique du LAAS-CNRS appartenant au réseau RENATECH et par le projet H2020-ICT-GateOne. Les auteurs remercient également l'Université de Wrocław (Pologne) pour leur support technologique et le NCBJ (Pologne) pour l'irradiation des capteurs.

Références

- [1] M. Jatlaoui, et al., « Working principle description of the wireless passive EM transduction pressure sensor », Eur. Phys/ J. Appl. Phys. 56, 2011.
- [2] I. Augustyniak, et al., « Micromechanical high-doses radiation sensor with bossed membrane and interferometry optical detection », Sensors & Actuators, Vol. 232, 2015.
- [3] E. Debourg et al., « High doses wireless radiation sensor using electromagnetic transducers », EuMW, 6-11 sept 2015, Paris, France.
- [4] E. Debourg et al., « Wireless Hydrogen Pressure Dosimeter for Nuclear High Dose Monitoring », IEEE Sensors, 30 oct - 2 nov 2016, Orlando, USA.