

## Dosimètre passif micro-onde pour la détection de radiation nucléaire à très fortes doses

J. Philippe<sup>1</sup>, M. Ferry<sup>2</sup>, S. Charlot<sup>1</sup>, A. Rumeau<sup>1</sup>, A. Lecestre<sup>1</sup>, G. Libaude<sup>1</sup>, A. Ferrand<sup>3</sup>, P. Pons<sup>1</sup>, H. Aubert<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS-CNRS), Université de Toulouse, CNRS, INPT, 7 Avenue du Colonel Roche, 31031 Toulouse

<sup>2</sup> Université Paris-Saclay, CEA, Service d'Etude du Comportement des Radionucléides, 91191, Gif-sur-Yvette

<sup>3</sup> Institut Clément Ader (ICA), Université de Toulouse, 31400 Toulouse  
ppons@laas.fr

**Résumé** – Cet article présente les performances d'un dosimètre passif sans fil fonctionnant sans batterie et permettant la détection de dose de radiation nucléaire. Cette dose est estimée à partir du dégazage d'un film de polyéthylène lors de l'irradiation. La surpression induite par ce dégazage dans une cavité provoque la déflexion d'une fine membrane de silicium de taille micrométrique située au-dessus d'un résonateur micro-onde planaire. La fréquence de résonance de ce résonateur varie ainsi en fonction de la dose. De tels dosimètres, sensibles à de faibles niveaux de doses, sont ici testés pour la première fois à de très fortes doses de radiation nucléaire de type  $\gamma$  pouvant atteindre 1000 kGy.

### 1. Introduction

Les dosimètres passifs et sans fil offrent des opportunités pour la détection de dose de radiation nucléaire en raison de leur longue durée de vie. Des exemples de capteurs passifs basés sur différents principes physiques ont été publiés dans la littérature scientifique [1], comme les dosimètres à réservoir d'hydrogène [2,3], des détecteurs nucléaires à l'état solide [4], mais aussi des capteurs dotés d'un film polymère à base d'alanine [5] ou munis de structures radio-photo-thermo-luminescentes [5-7]. Cependant, la plupart de ces dispositifs effectue des détections *post-factum* de la dose ou nécessite des moyens coûteux.

Afin de pallier à ces inconvénients, nous avons développé un capteur passif (sans énergie embarquée) et à interrogation radar [8] à l'aide des micro-technologies. Le capteur, présenté sur la Figure 1, est constitué de deux cavités réalisées par l'usinage et l'assemblage par soudure anodique de deux substrats de verre en borosilicate et d'un substrat de silicium haute résistivité (le procédé de fabrication est détaillé dans [9]). La « cavité 1 » de volume noté  $V_C$  dans la Figure 2 contient un film de polyéthylène à haute densité (HDPE) scellé hermétiquement sous vide. Sous irradiation, ce polymère libère essentiellement de l'hydrogène [1], ce qui produit une augmentation de la pression dans cette cavité hermétique. Cette surpression entraîne la déflexion d'une micro-membrane en silicium située au-dessus d'un résonateur coplanaire (dont la fréquence de résonance  $f_{res}$  est de 24 GHz), lui-même placé dans une seconde cavité,

appelée « cavité 2 ». La déflexion entraîne une modification mesurable de la fréquence de résonance du résonateur coplanaire. Les dimensions et les matériaux constituant le capteur sont donnés sur les Figures 2 et 3. Par rapport aux solutions existantes, cette structure présente l'avantage de permettre une détection sur quelques dizaines de mètres et en temps réel de la dose à l'aide d'un radar [10], limitant ainsi drastiquement l'intervention humaine dans des milieux radioactifs hostiles.

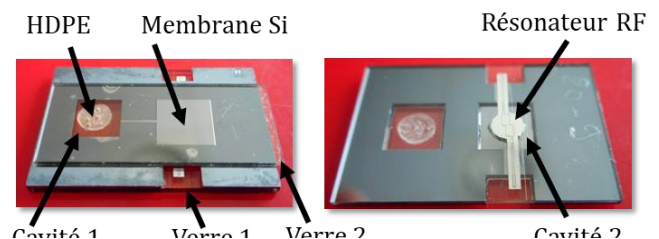


Figure 1. Présentation du capteur – vue de dessus (gauche) et de dessous (droite)

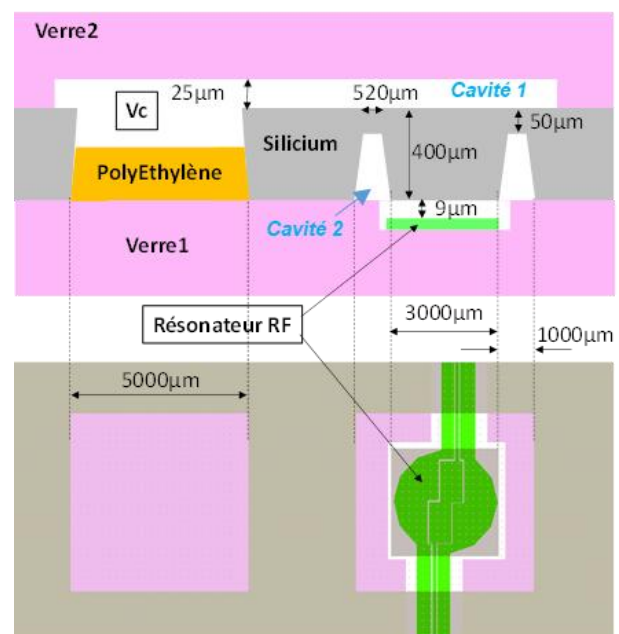


Figure 2. Schéma du capteur avec une vue en coupe (en haut) et une vue de dessus (en bas) [11]

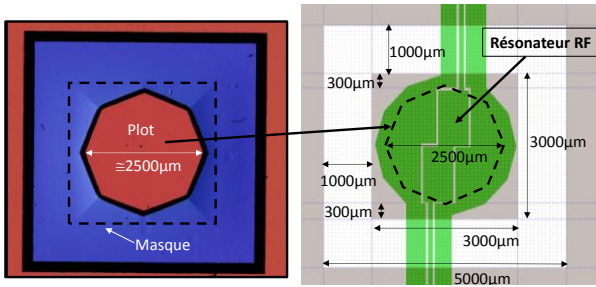


Figure 3. Photographie de la membrane (à gauche) et dessin des masques (à droite) [11]

De précédentes études menées par les auteurs [9] ont permis de caractériser la sensibilité de ces dosimètres pour des irradiations réalisées au canon à électron de 6 MeV et avec des niveaux de dose de l'ordre de 20 kGy. Des travaux antérieurs [1] ont par ailleurs validé l'herméticité des cavités obtenues par soudure anodique Silicium / Verre pendant 2.5 ans après une irradiation  $\gamma$  de 4000 kGy, validant ainsi l'utilisation de ces matériaux pour la mesure de fortes doses. Nous proposons ici d'étudier pour la première fois les performances mesurées de deux dosimètres passifs notés D1 et D2 irradiés respectivement à 501 kGy et 1100 kGy.

## 2. Modélisation des dosimètres

L'expression donnant la surpression  $P_g$  générée dans la cavité 1 d'un volume de gaz occupé  $V_g = V_C - V_{HDPE}$  renfermant un film de HDPE de masse  $m_{HDPE}$  et de volume  $V_{HDPE}$  de 2.11 mm<sup>3</sup> en fonction de la dose d'irradiation  $D$  est la suivante [1] :

$$P_g = G_{H_2} \cdot \frac{m_{HDPE} \cdot R \cdot T}{V_g} \cdot D \quad (1)$$

où  $R$ ,  $T$ , et  $G_{H_2}$  désignent respectivement la constante des gaz parfaits, la température et le rendement radiochimique d'émission de dihydrogène issu du HDPE. D'après [12], le facteur  $G_{H_2}$  (qui dépend de la dose) est de l'ordre de  $2,9 \times 10^{-7}$  mol/J pour une dose de 501 kGy et de

$2,5 \times 10^{-7}$  mol/J pour une dose de 1100 kGy. Le volume  $V_g$  est de 7,87 mm<sup>3</sup> pour le dosimètre D1 et de 7,57 mm<sup>3</sup> pour le dosimètre D2. Dans ces conditions, la pression attendue dans la cavité 1 après irradiation est estimée à environ 0,92 bar pour D1 et 1,82 bar pour D2. La surpression  $P_g$  ainsi générée provoque la déflexion d'une micro-membrane. Cette déflexion entraîne le décalage  $\Delta f_{res}$  de la fréquence de résonance du résonateur coplanaire donnée par :

$$\Delta f_{res} = \alpha \cdot P_g \quad (2)$$

où  $\alpha$  désigne la sensibilité en pression de la membrane. Cette dernière est déterminée avant irradiation par des mesures de variation de  $f_{res}$  à pression atmosphérique (1 bar) et sous vide. Cette fréquence est mesurée à l'aide de pointes coplanaires reliées à un analyseur de réseau vectoriel calibré avec une résolution de mesure du gain et en fréquence respectivement de +/- 0,05dB et de +/- 12MHz. La fréquence de résonance  $f_{res}$  correspondant à la fréquence pour laquelle le gain du coefficient en réflexion  $S_{ii}$  atteint son minimum, est déterminée avec une incertitude de l'ordre de +/- 100MHz. La sensibilité en pression de la membrane est

de 1,13 GHz/bar pour D1 et de 1,22 GHz/bar pour D2. Ainsi, le décalage  $\Delta f_{res}$  attendu du résonateur coplanaire est de 1,03 GHz pour D1 et de 2,22 GHz pour D2.

## 3. Analyse des résultats de mesure obtenus

Après irradiation, les fréquences de résonance des deux dosimètres réalisés sont à nouveau mesurées à l'aide de l'analyseur de réseau vectoriel. Une évaluation de la répétabilité des résultats de mesure est effectuée en posant à plusieurs reprises les pointes coplanaires sur un même dispositif. Ceci permet de s'assurer de la tenue du dépôt métallique constitutif du résonateur après irradiation. Les mesures montrent un très léger décalage de  $f_{res}$  à l'issue de ce test de répétabilité (variation de seulement 24 MHz pour D1 et de 61 MHz pour D2), ce qui valide le fait que les éventuels dommages causés sur le métal par les fortes irradiations (comme illustré en Figure 4) ont peu d'impact sur les performances électromagnétiques du résonateur coplanaire.

Par ailleurs, le décalage  $\Delta f_{res}$  mesuré après irradiation est de l'ordre de 1,04 GHz pour D1 et 2,08 GHz pour D2. Ces résultats de mesure sont en très bon accord avec les prédictions réalisées dans la section 2 (à savoir un décalage fréquentiel de 1,03 GHz pour D1 et de 2,22 GHz pour D2) et valident en particulier la valeur théorique adoptée pour le rendement radiochimique d'émission du dihydrogène  $G_{H_2}$  du HDPE (à savoir  $2,9 \times 10^{-7}$  mol/J à 501 kGy et  $2,5 \times 10^{-7}$  mol/J à 1100kGy).

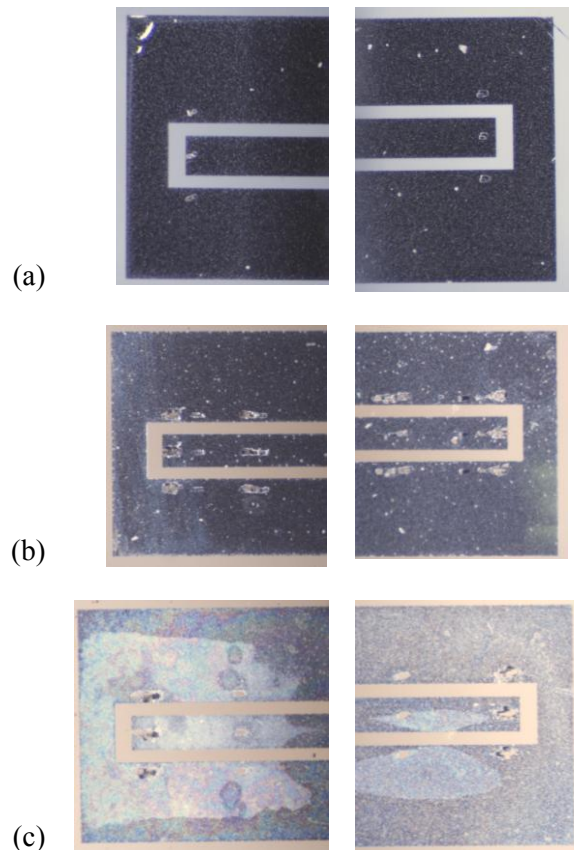


Figure 4. Photographies des accès RF (a) d'un résonateur non irradié ; (b) du capteur D1 après irradiation à 501 kGy et (c) du capteur D2 après

## irradiation à 1100 kGy

Des mesures de variation de fréquence de résonance ont également été menées avant et après irradiation sur des structures similaires dépourvues de PE. Le décalage en fréquence avant et après irradiation peut atteindre jusqu'à 220 MHz et 390 MHz respectivement pour des dispositifs irradiés à 501 kGy et 1100 kGy. Ces changements de fréquence pourraient être expliqués par une possible modification de la structure du verre et en particulier de ses propriétés RF. Néanmoins, ces variations de fréquence représentent environ 20% de la variation totale de  $f_{res}$  des structures avec PE, tendant à montrer que le décalage en fréquence proviendrait majoritairement du dégazage du polymère.

Pour des irradiations de faibles doses (*i.e.*, de 10 à 20 kGy), Les précédentes études menées sur plusieurs dosimètres passifs analogues ont cependant montré une grande dispersion en sensibilité [8-10]. Des hypothèses avaient été avancées pour expliquer cette dispersion, notamment sur la non uniformité éventuelle des membranes de silicium d'une cellule à l'autre [11]. Néanmoins, au vu de l'évolution antérieure de  $f_{res}$  de ces cellules (décrite dans le tableau 1) irradiées à quelques dizaines de kGy, la cause la plus probable pour rendre compte des résultats de mesure de la sensibilité est la présence de charges et additifs en faible quantité dans le film de HDPE. Cette pollution est en effet susceptible de modifier les mécanismes mis en jeu dans la radiolyse du polyéthylène aux faibles doses et de provoquer une modification de la quantité de gaz émis par le polymère, modifiant ainsi la production de dihydrogène issue du polyéthylène (voir en particulier les résultats pour le dosimètre D1). Cette première irradiation est susceptible d'entraîner un dégazage d'environ 2,12bar en considérant une sensibilité en pression de la membrane d'environ 1,13GHz/bar. Un traitement adéquat du film de polyéthylène décrit et expérimenté dans [1] a permis de diminuer drastiquement ce dégazage parasite par le nettoyage du film avec différents solvants (acétone, éthanol) et un recuit sous vide à environ 350°C.

**Tableau 1. Fréquence de résonance des dosimètres D1 et D2 avant et après irradiation à 20 kGy**

Dosimètre	Fréquence de résonance (GHz)		
	avant irradiation	après irradiation 1	après irradiation 2
D1	24,85	22,45	22,63
D2	25,20	25,17	-

## 4. Conclusion

Les résultats de mesure donnés dans cet article valident expérimentalement la fonctionnalité des dosimètres passifs proposés. Ces derniers permettent la mesure de fortes doses (jusqu'à 1000 kGy) avec un très bon accord avec les estimations théoriques.

Des travaux sont en cours afin d'augmenter la sensibilité à fortes doses de ce type de capteur, en jouant sur la réduction de l'épaisseur de la membrane, sur le

volume libre occupé par le gaz, et sur la géométrie du résonateur RF.

## 5. Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet CARANUC cofinancé par la Région Occitanie, le fond Européen de développement Régional et la compagnie EDF. Ils ont également bénéficié du soutien de la plateforme technologique du LAAS-CNRS appartenant au réseau RENATECH.

## Références

- [1] J. Philippe, et al., «*Microelectromechanical Transducer to Monitor High-Doses of Nuclear Irradiation*», Sensors 2021, 21, 5912.
- [2] C. Yamaguchi, et al., «*Integrating Radiation Dosimeter Using Polyethylene and Pirani Vacuum Gauge for the Range*», Nucl. Instrum. Methods, vol. 154, pp. 465-469, 1978.
- [3] M. Coche, et al., «*Comparison of High-Dose Dosimetry Systems in Accelerator Radiation Environments*», TIS Commission Report TIS-RP/205; CERN: Geneva, Switzerland, p. 27, 1988.
- [4] K. Brabcová, et al., «*Dosimetry in Heavy Ion Beams Using Various Detectors*», Radiation Measurements, vol. 45, pp. 1384-1386, 2010.
- [5] L. Xie, et al., «*Dosimetry and Application of the Alanine-Polymer Film Dosimeter*», Radiation Physics and Chemistry, vol. 63, pp. 817-820, 2002.
- [6] D. Nakauchi, et al., «*Photo-, Radio- and Thermo-Luminescence Properties of Eu-Doped BaSi<sub>2</sub>O<sub>5</sub> Glass-Ceramics*», Optik, vol. 185, pp. 812-820, 2019.
- [7] F. Ravotti, et al., «*Radiation Monitoring in Mixed Environments at CERN: From the IRRAD6 Facility to the LHC Experiments*», IEEE Trans. Nucl. Sci., vol 54, pp. 1170-1177, 2007.
- [8] D. Henry, et al., «*Classification of Radar Echoes for Identification and Remote Reading of Chipless Millimeter-Wave Sensors*», IEEE TMTT, vol. 69, 2021.
- [9] E. Debourg, et al., «*Wireless Hydrogen Pressure Dosimeter for Nuclear High Dose Monitoring* », IEEE Sensors, Oct. 2016, Orlando, FL, USA.
- [10] C. Arenas, et al., «*Wireless and Passive Nuclear Radiation Sensors* », EuMW, 10-12 Oct. 2017, Nuremberg, Germany.
- [11] C. Arenas, et al., «*Capteur micro-onde de radiation nucléaire passif sans fil optimisé* », Journées Nationales Microondes, JNM, Saint-Malo, France, Mai 2017.
- [12] T. Seguchi, «*Mechanisms and Kinetics of Hydrogen Yield from Polymers by Irradiation* », Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. Mater. At. vol. 185, pp. 43-49, 2001.