



HAL
open science

Dispositif de protection microonde par décharge plasma : un modèle numérique auto-cohérent confronté aux mesures expérimentales

Lucas Fuster, G J M Hagelaar, Romain Pascaud, Antoine Simon, Pascal Hoffmann, Laurent Liard, Olivier Pascal, Thierry Callegari

► To cite this version:

Lucas Fuster, G J M Hagelaar, Romain Pascaud, Antoine Simon, Pascal Hoffmann, et al.. Dispositif de protection microonde par décharge plasma : un modèle numérique auto-cohérent confronté aux mesures expérimentales. XXIIèmes Journées Nationales Microondes, Jun 2022, Limoges, France. 4 p. <hal-04881613>

HAL Id: hal-04881613

<https://hal.science/hal-04881613v1>

Submitted on 12 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Dispositif de protection microonde par décharge plasma : un modèle numérique auto-cohérent confronté aux mesures expérimentales

L. Fuster^{1,2,3}, G. Hagelaar², R. Pascaud³, A. Simon⁴, P. Hoffmann¹, L. Liard², O. Pascal² et T. Callegari²

¹Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives - Centre de Gramat, BP 80200 46500 Gramat, France

²LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France

³ISAE-SUPAERO, Université de Toulouse, France

⁴ANYWAVES, Toulouse, France

lucas.fuster@laplace.univ-tlse.fr

Résumé — Un limiteur de puissance microonde en technologie microruban suspendue intégrant une micro décharge plasma (MHCD) a été étudié expérimentalement et numériquement. Des bilans de puissance transitoires et stationnaires exhibent un seuil de limitation de 28 dBm et un temps de réponse de 25 μ s. En outre, un modèle numérique auto-cohérent a été proposé pour simuler l'interaction entre les microondes et le plasma. Il donne des résultats en bon accord avec les mesures expérimentales.

1. Introduction

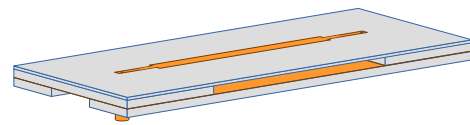
Avec le développement de sources microondes de forte puissance (HPM), il devient nécessaire d'améliorer la protection des chaînes de télécommunications, en particulier contre les attaques provenant d'armes à énergie dirigée [1]. Actuellement, les diodes PIN ou les MEMS sont utilisés pour le durcissement électromagnétique des circuits [2, 3]. Cependant, ils peuvent être détériorés voire détruits si la puissance de l'agression dépasse quelques dizaines de Watts [4]. D'autres voies doivent donc être explorées, comme par exemple celles incluant des plasmas.

Dans cet article, nous présentons un nouveau prototype de limiteur en technologie microruban suspendue, intégrant un plasma d'Argon. L'introduction d'une micro-décharge dans le limiteur pour pré-ioniser le milieu a permis d'abaisser le seuil de déclenchement du dispositif. Ce dernier a été caractérisé expérimentalement en terme de limitation de puissance. Enfin, la structure quasi-TEM du champ électrique dans le limiteur permet d'effectuer des simulations multi-physiques en deux dimensions. L'interaction non-linéaire entre le champ microonde et le plasma a ainsi été étudiée à l'aide d'un code de calcul développé au laboratoire LAPLACE [5, 6], afin de mieux comprendre les phénomènes en jeu dans le dispositif.

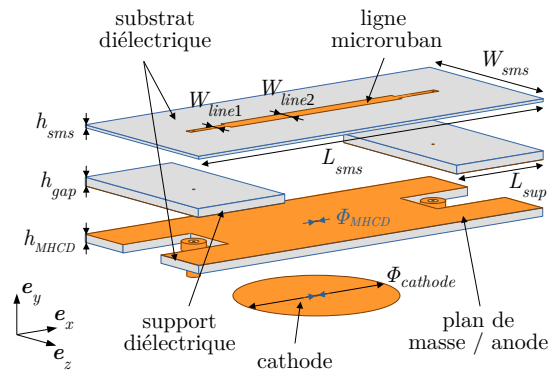
2. Limiteur et protocole expérimental

2.a. Description du limiteur

Le limiteur de puissance conçu consiste en une ligne de transmission imprimée, dans laquelle une cavité a été aménagée afin qu'un plasma s'y développe durant la limitation de puissance. On se retrouve donc avec la mise



(a) Vue générale.



(b) Vue éclatée.

FIGURE 1. Schema du limiteur en technologie microruban suspendue.

en série de tronçons de lignes microruban et microruban suspendue (cf. Fig. 1).

Le circuit a été réalisé sur un substrat Rogers RO4003C ($\epsilon_r = 3.55$, $\tan \delta = 0.0021$). L'épaisseur des supports diélectriques est de $h_{gap} = 1.524$ mm, pour une longueur de $L_{sup} = 50$ mm, tandis que l'épaisseur du substrat diélectrique est de $h_{sms} = 0.508$ mm. La largeur de la ligne varie en fonction de la configuration diélectrique entre les deux conducteurs ($W_{line1} = 4.5$ mm, $W_{line2} = 8$ mm), afin de conserver une impédance caractéristique de 50 Ω . L'épaisseur totale de la ligne est alors de $h_{tot} = h_{gap} + h_{sms} = 2.032$ mm, et la cavité fait 100 mm de long.

Le circuit DC qui assure la pré-ionisation (MHCD) est constitué d'une cathode cylindrique de diamètre

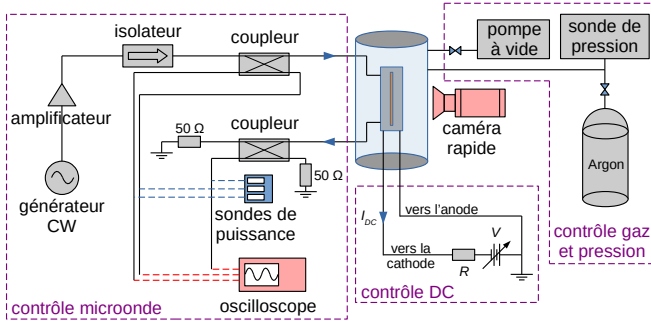


FIGURE 2. Dispositif expérimental pour les mesures de forte puissance microonde en régimes stationnaire et transitoire.

$\Phi_{cathode} = 80$ mm, imprimée sur la deuxième face du substrat diélectrique portant le plan de masse, ce dernier jouant le rôle d'anode pour la MHCD, comme indiqué sur la Fig. 1b. Un trou a été foré à travers le plan de masse, le diélectrique et la cathode. Les dimensions de la MHCD ($h_{MHCD} = 1.524$ mm et $\Phi_{MHCD} = 1$ mm) ont été optimisées pour un fonctionnement à 10 Torr dans l'Argon.

2.b. Protocole expérimental

Comme le montre la Fig. 2, un dispositif expérimental spécifique a été mis en œuvre pour effectuer une caractérisation en puissance du limiteur.

Le circuit de la Fig. 1 est ainsi placé dans une enceinte en verre dans laquelle on contrôle le type de gaz et sa pression. A terme, le limiteur sera encapsulé pour s'affranchir du système de pompage et d'injection de gaz. Une deuxième unité permet le contrôle du courant et de la tension DC de pré-ionisation (MHCD) du limiteur à plasma. Enfin, l'unité microonde sert à générer un signal continu ou pulsé dont on règle la fréquence et la puissance. Les puissances incidente, réfléchiée et transmise sont alors mesurées à l'aide de sondes de puissance pour établir le bilan de puissance en régime stationnaire, ou avec un oscilloscope pour observer le régime transitoire.

Par la suite on considérera pour ces mesures une enceinte remplie d'Argon à 10 Torr, un courant de pré-ionisation de 3 mA dans la MHCD et un signal d'agression microonde harmonique à 3 GHz.

3. Modèle numérique

3.a. Géométrie simulée

La ligne suspendue (cf. Fig. 1) a un rapport d'aspect $w_{line2}/(h_{gap} + h_{sms})$ de 3.9. Les effets de bords peuvent alors être négligés, et le dispositif considéré comme une ligne microruban inhomogène. On se propose donc de simuler cette ligne en 2D comme décrit sur la Fig. 3 qui représente une partie de la ligne de transmission suspendue dans le plan (x, y) .

Le modèle 2D suppose la géométrie invariante dans la direction z . Le champ magnétique est polarisé suivant la direction z . Le mode dans la cavité à vide est alors quasi-TEM dans la limite des basses fréquences, et aucun mode d'ordre supérieur n'est excité si $k_0(h_{gap} + h_{sms}) \ll 1$, où

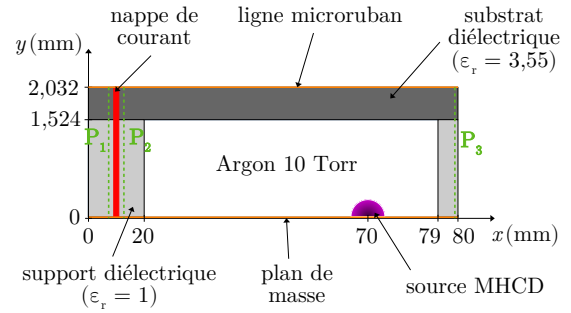


FIGURE 3. Géométrie simulée. Les parties métalliques et diélectriques sont respectivement en orange et gris.

k_0 est le nombre d'onde dans le vide [7]. Cette condition est vérifiée à notre fréquence de travail de 3 GHz.

Pour réduire le temps de calcul, la longueur de la cavité à droite de la MHCD ($x > 70$ mm sur la Fig. 3) a été réduite à 9 mm. Cette modification ne change pas les résultats numériques dans l'intervalle de puissance étudié. La permittivité relative des supports diélectriques en entrée et sortie a été prise égale à 1 dans les simulations, au lieu de 3.55 en expérience, afin de reproduire l'adaptation d'impédance à vide, qui est réalisée pour le circuit de test par un changement de largeur de la ligne.

Enfin, une injection artificielle d'électrons germes dans la cavité permet de reproduire l'effet de pré-ionisation de la MHCD.

3.b. Modèles microonde et plasma

Etant donné que le plasma évolue sur une échelle de temps long (microseconde) et les microondes sur une échelle de temps court (inférieur à la nanoseconde), ce modèle multi-physique est composé de deux sous-modèles décrivant les deux échelles de temps séparément.

Le sous-modèle plasma consiste en un ensemble d'équations fluides s'établissant sur l'échelle de temps long, et donnant notamment l'évolution de la densité d'électrons n_e et de l'énergie des électrons au sein de la décharge plasma microonde [6]. En particulier, l'équation de conservation de l'énergie pour les électrons, fait intervenir la puissance microonde absorbée par électron P_e .

Le sous-modèle microonde sur l'échelle de temps court est constitué de l'équation de Maxwell-Faraday, ainsi que de l'équation de Maxwell-Ampère qui s'écrit :

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{B} = \vec{J}_{exc} - en_e \vec{v}_e + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1)$$

où \vec{E} et \vec{B} sont les champs électrique et magnétique microonde, \vec{J}_{exc} un courant électrique externe qui excite les microondes, μ_0 la perméabilité magnétique du vide et \vec{v}_e la composante oscillante de la vitesse des électrons, qui vérifie l'équation de quantité de mouvement locale :

$$\frac{\partial \vec{v}_e}{\partial t} = -\frac{e}{m_e} \vec{E} - \nu_e \vec{v}_e \quad (2)$$

avec ν_e la fréquence de collision entre les électrons et les neutres, m_e la masse d'un électron, et e la charge fondamentale.

Ces deux sous-modèles sont donc couplés via la puissance microonde absorbée par les électrons, qui alimente le plasma, ainsi que par le courant d'électrons $\tilde{\mathbf{J}}_e = -en_e\tilde{\mathbf{v}}_e$ qui modifie le champ microonde. Au cours de la simulation, le sous-modèle microonde est périodiquement appelé pour mettre à jour le profil de puissance microonde absorbée à partir du dernier profil plasma calculé.

Du point de vue numérique, le sous-modèle plasma est résolu par une méthode semi-implicite de volumes finis dans le domaine temporel utilisant un maillage spatial rectangulaire uniforme. Pour la résolution des équations de Maxwell, on utilise la méthode des différences finies dans le domaine temporel avec un maillage de Yee coïncidant avec le maillage du sous-modèle plasma. On considère ici des conditions aux limites de type conducteur parfait aux frontières du métal (en haut et en bas sur la Fig. 3) et des conditions aux limites d'absorption de Mur du premier ordre aux frontières ouvertes (à gauche et à droite sur la Fig. 3). Enfin, le courant d'excitation $\tilde{\mathbf{J}}_{exc}$ est introduit par ajout d'une nappe de courant dans le domaine de simulation (en rouge sur la figure 3). L'amplitude de $\tilde{\mathbf{J}}_{exc}$ est fixée à une valeur arbitraire, et donc les amplitudes de $\tilde{\mathbf{E}}$, $\tilde{\mathbf{B}}$, et $\tilde{\mathbf{v}}_e$ sont elles aussi arbitraires. Elles doivent donc être renormalisées après coup, ce qui est réalisé en imposant une puissance incidente fixée, comme décrit dans [6].

4. Résultats

4.a. Bilan de puissance stationnaire

Sans pré-ionisation ($I_{DC} = 0$ mA), aucune limitation n'est observée dans la gamme de puissance testée (i.e., jusqu'à 43 dBm ou 20 W de puissance incidente). Dans ce cas, le champ microonde n'est pas assez intense pour amorcer un plasma. Un courant de préionisation de $I_{DC} = 3$ mA est ensuite imposé. Les taux de puissances réfléchie, absorbée et transmise, à l'état stationnaire, ont été mesurés pour des puissances incidentes allant de 25 à 43 dBm. Ils sont présentés sur la Fig. 4. On reconnaît la réponse typique d'un limiteur de puissance absorptif. En effet, les taux de puissance restent constants tant que la puissance incidente P_{inc} demeure inférieure au seuil de limitation, ici de 28 dBm. Lorsque P_{inc} excède 28 dBm, le claquage microonde a lieu et le taux de puissance transmise décroît alors que les taux de puissances réfléchie et dissipée augmentent. La diminution de la puissance transmise est principalement liée à l'absorption de la puissance microonde par le plasma, ce qui est cohérent avec des résultats obtenus pour des limiteurs plasma large bande [8].

Comme on peut le voir sur la Fig. 4, les simulations sont en bon accord avec les résultats expérimentaux. Des écarts existent pour de faibles puissances d'entrée, principalement dus au fait que le modèle ne prend pas en compte les pertes dans le diélectrique et les transitions coaxiales, responsables d'une légère désadaptation d'impédance. Pour des puissances supérieures à 40 dBm, la divergence vient très probablement du chauffage du gaz qui peut entraîner une modification locale de la pression, effet qui n'est pas pris en compte dans le modèle numérique.

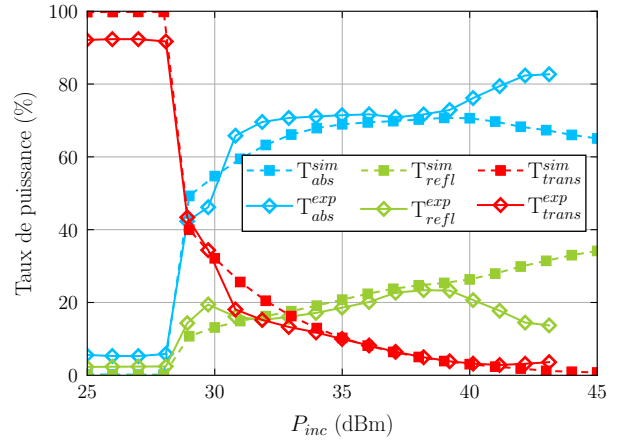


FIGURE 4. Taux de puissances en régime stationnaire simulés et mesurés en fonction de la puissance incidente à 3 GHz et dans l'Argon à 10 Torr.

4.b. Bilan de puissance transitoire

Les taux de puissances transitoires simulés et mesurés, pour une puissance incidente de 10 W (i.e., 40 dBm) sont présentés sur la Fig. 5. Le temps de réponse du dispositif pour cette puissance incidente est de 25 μs . La dynamique du plasma simulée est présentée sur la Fig. 6. De plus, la Fig. 7 montre l'évolution de la densité électronique moyennée sur le volume de la cavité $\langle n_e \rangle_{x,y}$ et l'évolution du maximum de densité électronique $max(n_e)$. Quatre étapes peuvent alors être distinguées dans la dynamique du plasma (les temps donnés proviennent de la simulation) :

- (1) Avant l'impulsion microonde, la MHCD est à l'état stationnaire avec une densité électronique localisée de valeur maximale $9 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$. De $t = 0 \mu\text{s}$ à $t_1 = 2.31 \mu\text{s}$, le claquage microonde se produit, entraînant une augmentation de la densité électronique qui passe par un maximum à t_1 (cf. Fig. 7). Cela correspond à la forte augmentation du taux de puissance absorbée qui atteint un maximum local à t_1 . Comme le montre la Fig. 6, le maximum de densité demeure localisé à la position de la MHCD jusqu'à $t_2 = 10.9 \mu\text{s}$, et le taux de puissance absorbée reste à-peu-près constant.
- (2) De t_2 à $t_3 = 16.11 \mu\text{s}$, le maximum de densité électronique se propage vers la droite de la MHCD tout en décroissant. Simultanément, on observe un accroissement de n_e à gauche de la MHCD. A t_3 , ces deux pics de densité ont la même amplitude.
- (3) De t_3 à $t_4 = 26.70 \mu\text{s}$, la densité électronique finit sa décroissance à droite de la MHCD et sa croissance à gauche, soit l'endroit d'où provient la puissance microonde incidente P_{inc} . Le taux de puissance absorbée croît et les taux de puissances réfléchie et transmise diminuent. A t_4 la densité électronique moyenne $\langle n_e \rangle_{x,y}$ se stabilise et une structure de densité stable est alors générée (cf. Fig. 6).
- (4) Finalement, cette structure se propage de la MHCD jusqu'à l'entrée du dispositif. Les taux de puissance atteignent alors l'état stationnaire.

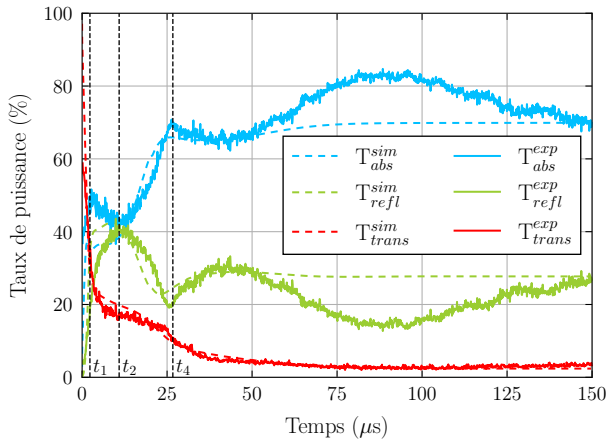


FIGURE 5. Taux de puissances en régime transitoire simulés et mesurés en fonction du temps pour $P_{inc} = 40$ dBm, à 3 GHz et dans l'Argon à 10 Torr.

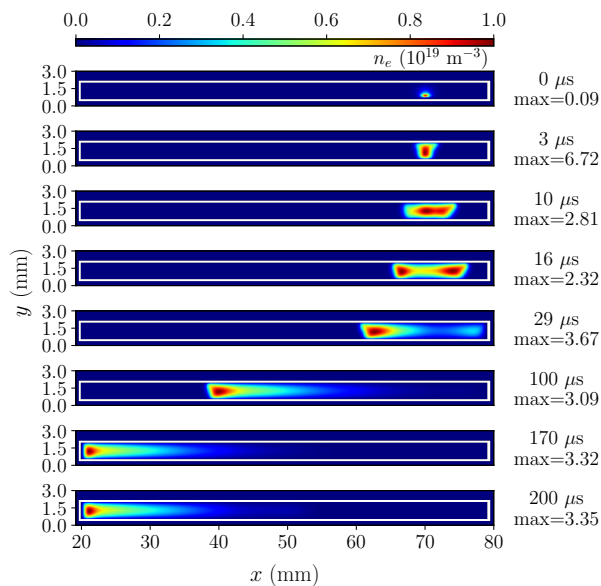


FIGURE 6. Dynamique du plasma simulée pour $P_{inc} = 40$ dBm, à 3 GHz et dans l'Argon à 10 Torr.

5. Conclusion

Un dispositif de protection microonde en technologie microruban suspendue a été proposé, dans lequel le champ microonde incident amorce un plasma dans un gaz d'Argon à 10 Torr, préalablement préionisé à l'aide d'une micro décharge (MHCD). Les performances du limiteur ont été étudiées expérimentalement en mesurant les puissances absorbée et réfléchiée. Ces résultats ont été confrontés à ceux provenant d'un code de calcul auto-cohérent simulant l'interaction non-linéaire entre les microondes et le plasma, avec un bon accord.

6. Remerciements

Nous remercions la Direction Générale de l'Armement (DGA), l'Agence Innovation de Défense (AID), la Région Occitanie et l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-21-ASM1-0002-02) pour leur support financier.

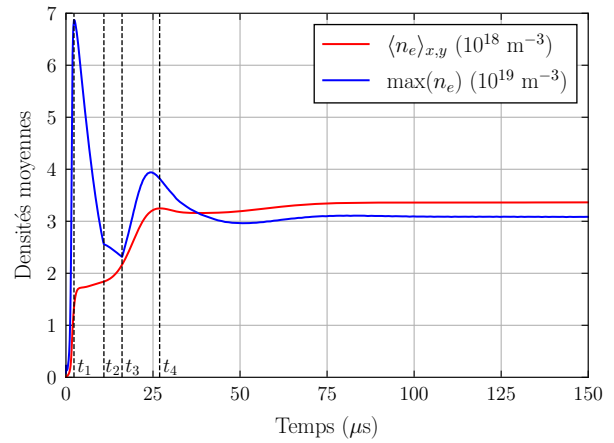


FIGURE 7. Evolution de la densité électronique moyenne simulée au cours du temps pour $P_{inc} = 40$ dBm, à 3 GHz et dans l'Argon à 10 Torr.

Références

- [1] M. G. Backstrom and K. G. Lovstrand, "Susceptibility of electronic systems to high-power microwaves : Summary of test experience," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 46, no. 3, pp. 396–403, Aug. 2004.
- [2] S. S. Yang *et al.*, "A novel analysis of a Ku-band planar p-i-n diode limiter," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 57, no. 6, pp. 1447–1460, Jun. 2009.
- [3] D. Shojaei-Asanjan and R. R. Mansour, "Tunable RF MEMS-based frequency-dependent power limiter," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 64, no. 12, pp. 4473–4481, Dec. 2016.
- [4] J. Zhao *et al.*, "Damage accumulation mechanism in PIN diode limiters induced via multiple microwave pulses," *Sci. Rep.*, vol. 10, p. 1709, 2020.
- [5] G. J. M. Hagelaar *et al.*, "Modelling of a dipolar microwave plasma sustained by electron cyclotron resonance," *J. Phys. D : Appl. Phys.*, vol. 42, p. 194019, Sep. 2009.
- [6] L. Fuster *et al.*, "Plasma-based microwave power limitation in a printed transmission line : a self-consistent model compared with experimental data," *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 31, no. 2, p. 025009, Feb. 2022.
- [7] R. E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering, Second Edition*. Wiley-IEEE Press, 2001.
- [8] A. Simon *et al.*, "Experimental study of microwave power limitation in a microstrip transmission line using a DC plasma discharge for preionization," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 46, no. 7, pp. 2512–2520, Jul. 2018.