JS 24
ONDES AU SERVICE DES PLASMAS
PLASMAS AU SERVICE DES ONDES

Etude du vieillissement des magnétrons industriels moyenne puissance

Ph. Benech, J.-M. Duchamp [1]

[1] *Université Grenoble-Alpes, CNRS, Grenoble INP, laboratoire G2Elab, UMR5269,*
jean-marc.duchamp@grenoble-inp.fr

Mots clés (en français et en anglais) :Magnetrons, vieillisement, température filament. Magnetron, Time life, Cathode temperature

Résumé

Cet article présente les résultats d'une analyse faite sur 15 magnétrons industriels de 6 kW en fin de vie. Les images MEB des filaments ont mis en évidence des faiblesses mécaniques à l'origine des défaillances. Ces stress mécaniques sont principalement liés aux mécanismes de dilatation thermiques. Une analyse X a permis d'exclure des problèmes de diffusion ou de pollutions surfaciques du filament. Enfin à partir d'une simple mesure de la tension filament il est possible d'estimer la température du filament et donc de contrôler les variations brutales de température limitant les sources de stress

1 Introduction causes de défaillances des magnétrons

Les magnétrons sont devenus des objets usuels de nos vies quotidiennes au travers de nos fours micro-onde mais ils sont également présents dans de nombreuses applications industrielles depuis les dépôts de couches minces en micro-électroniques, jusqu'à de nombreuses étapes de l'agroalimentaire : comme le séchage, la pasteurisation, la décontamination ou encore des traitements de déchets organiques [1]. Bien que ces magnétrons soient omniprésents dans nos environnements, ils restent des objets complexes combinant haute tension, magnétisme, forte puissance et hyperfréquence.

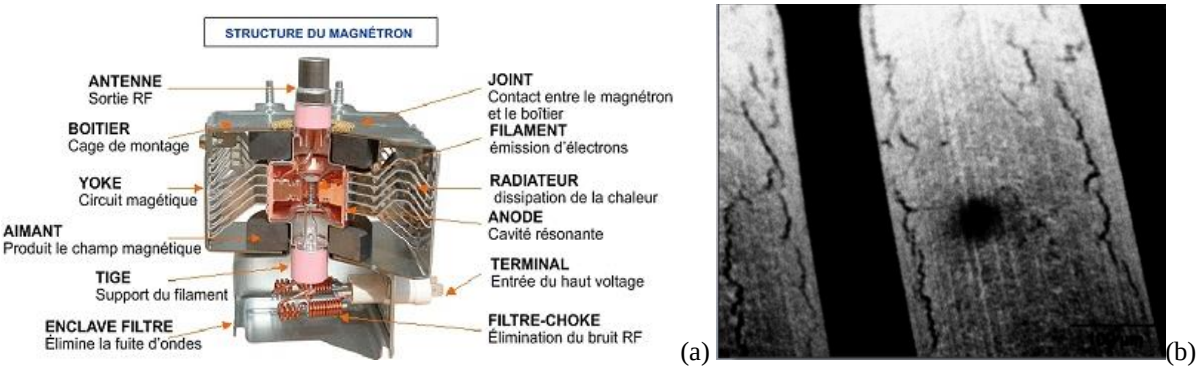

Figure 1 : Synoptique d'un magnétron à cavités coaxiales (a) et image MEB d'un filament (b)

Si le principe physique ces tubes à vide a été bien décrit [2], l'étude de leur fiabilité et de leur durée de vie sont nettement moins documentées [2]. Toutefois, s'il est évident que leur talon d'Achille réside dans le filament (Figure 1b) et son usure, cet article tente de démontrer qu'un des paramètres clés de leur fiabilité est la température de fonctionnement du filament. La synthèse de l'analyse de pièces constitutives d'une quinzaine de magnétrons en fin de vie ou défaillants est présentée dans la deuxième partie. A l'issue nous proposons une méthode d'estimation et de contrôle de cette température.

2 Analyse des causes du vieillissement des filaments de magnétrons et modèle thermique.

L'émission thermoïonique du filament est à l'origine du plasma dans le magnétron. Cette émission décrite par équation de Richardson donne la densité de courant J_A (A/cm^2) en fonction de la température T du filament (°K). Nous avons testé 15 magnétrons (6kW @ 2.45 GHz). Notre attention s'est portée sur l'analyse optique au microscope électronique (MEB) et la constitution physico-chimique des filaments à l'aide d'imagerie X. Pour ces magnétrons, le filament est un solénoïde de tungstène. Les images MEB ont démontré l'existence de stress

thermique (Figure 1 b) à l'origine défaillance des filaments. La section de spire cassée, montre une zone d'émissivité pelliculaire d'une épaisseur d'environ 100 µm (Figure 2 : a) avec une texture différente du centre de la spire surement à l'origine des craquelures. L'analyse X montre la prédominance de tungstène. Toutefois des traces de nobium et de titane (matériaux présents dans les chapeaux ou getter du filament) ont pu être détectées.

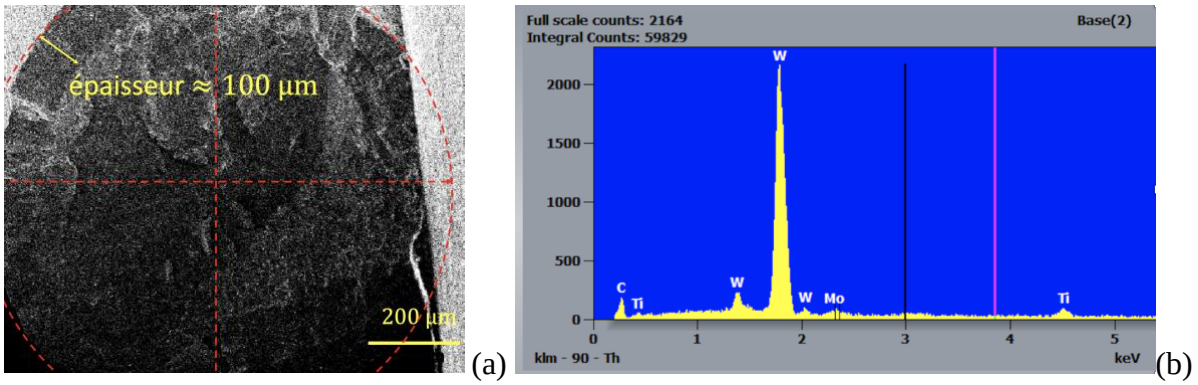

Figure 2 : Images MEB de la spire 9 du filament du magnétron 14

Pour limiter le stress thermique il est nécessaire d'avoir un contrôle précis de la puissance Joule dissipée par le filament et donc d'être en mesure d'estimer la valeur de sa résistance, qui augmente d'un facteur 10 entre 300°K à 2000°K. Cette variation est essentiellement liée à celle de l'évolution de la résistivité du tungstène. En effet la forme de solénoïde permet de compenser la dilation thermique du diamètre du fil par l'élongation du filament. Il est alors possible de déduire un modèle parabolique de l'expression de la résistance (avec a_R = 4,54 10^{-7} et b_R =4,06 10^{-3}). Ainsi il est possible d'estimer la température du filament à l'aide de la mesure de sa résistance. Toutefois les mesures conjointes de la tension et du courant filament lorsque ce dernier est porté à la tension d'anode de l'ordre dev 1 kV ne sont pas simples.

$$R_f(T) = R_f(T_0)(a_R.T^2 + b_R.T) \quad (1)$$

L'énergie électrique absorbée par le filament est transformée en chaleur, puis dissipée dans le vide par rayonnement électromagnétique et par quanta (loi de Planck, et loi de Stefan-Boltzmann). Ainsi, le filament dans un tube à vide atteint une température d'équilibre T qui dépend uniquement la puissance électrique d'alimentation V_f. En réintroduisant l'expression de la résistance en fonction de la température il devient alors possible d'obtenir la relation dans laquelle seule la tension de filament V_f pour estimer la température du filament T.

$$\frac{{V_f}^2}{R_f(T_0).\sigma.S_E} \approx .T^4(a_R.T^2 + b_R.T) \quad (2)$$

3 Conclusion

Dans cet article, nous avons mis en évidence la présence de stress mécanique sur les filaments des magnétrons testés qui sont d'origine thermique. Ce stress des filaments diminue la durée de vie des magnétrons. Un contrôle des variations de température du filament lors des cycles de fonctionnement industriel (cycles de chauffage filament, cycles d'auto-entretiens lors de la présence du plasma voire cycles de sécurité liés à des décharges éléctriques entre anode et cathode) permet de limiter ces stress et donc d'augmenter la durée de vie des magnétrons. Cet article propose un mode de contrôle basé sur la seule mesure de la tension du filament (portée à haute tension) pour estimer la température du filament voire de suivre ce paramètre durant le fonctionnement du magnétron pour tenter de modéliser son vieillissement.

Références bibliographiques

[3] T. Lemoine, "Tubes électroniques hyperfréquences Tubes de très forte puissance", *Techniques de l'ingénieur Électronique*, 2017, ref. e1621, doi:10.51257/a-v2-e1621.

[2] Kohl, Walter Heinrich. *Materials technology for electron tubes*. Book Division, Reinhold Publishing Corporation, 1951.

[4] K. Hirayama, et al, “3D particle-in-cell simulation on efficiency and back-bombardment of an oven magnetron, ” *2016 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*, Monterey, CA, 2016, pp. 1-2