

Plasma à pression atmosphérique : Décharges contrôlées par barrière diélectrique, physique et conception de réacteurs

Françoise Massines

*Laboratoire Procédés, Matériaux, Energie Solaire, PROMES - CNRS
Rambla de la thermodynamique, 66100 Perpignan, France.
courriel : francoise.massines@univ-perp.fr*

A pression atmosphérique et température ambiante, la densité du gaz, $2,46 \cdot 10^{19}$ atomes ou molécules/cm³, est telle que le libre parcours moyen des électrons est inférieur au micron. En conséquence, lorsque la distance interélectrode est de l'ordre du millimètre ou plus, l'ionisation du gaz, rapide et localisée, conduit à la formation d'arcs électriques. Pour maintenir le gaz à température ambiante, il est nécessaire de stopper la décharge en typiquement moins de 500ns pour que le niveau d'ionisation reste en dessous de 10^{-4} . Parmi les différentes solutions pour atteindre cet objectif, la décharge contrôlée par barrière diélectrique, DBD, est la plus robuste, la plus souple d'utilisation puisque facilement obtenue dans les configurations géométriques les plus variées, pour des formes d'excitations et des gaz très différents [1, 2, 3].

Le principe en est simple. Un isolant électrique solide est mis entre les électrodes, dans le passage du courant, de telle façon que la tension appliquée sur les électrodes se répartisse entre le diélectrique solide et le gaz. Ainsi, lorsque le gaz devient conducteur, l'isolant solide se charge, la tension à ses bornes augmente, celle appliquée sur le gaz diminue ce qui induit l'extinction de la décharge avant que le niveau d'ionisation du gaz soit suffisant pour induire le passage à l'arc.

Les DBD ont été introduites dès 1857 par W. Siemens pour la production d'ozone. Elles ont ensuite eu d'autres applications comme les lasers CO₂ qui génèrent un rayonnement cohérent dans l'infrarouge et les lampes excimers dont le rayonnement dans ultraviolet est utilisé pour exciter un phosphore qui émet dans le visible. Ce principe est à la base de lampes fluorescentes sans mercure et des écrans plats à panneaux plasmas. Les DBD sont aussi largement utilisées pour traiter des kilomètres carrés de surface en continu avec le procédé corona. Actuellement, de nouvelles applications comme les jets de plasma pour la stérilisation ou le dépôt de couches minces en continu sur des substrats plan défilant dans la zone plasma émergent. Le renouveau a été apporté par la mise en évidence de nouveaux modes de décharge obtenus dans des configurations DBD. Ainsi, une configuration très simple, typiquement, 2 électrodes parallèles recouvertes d'un diélectrique, conduit à des décharges dont la physique est très différente ce qui se traduit par exemple par une densité d'électrons pouvant varier de 10^8 à 10^{15} /cm³ tout en maintenant la température du gaz à la température ambiante.

L'objet de cet exposé sera tout d'abord de présenter la physique des différentes DBD obtenues pour des produits de la distance interélectrode par la pression suffisamment élevés pour qu'un claquage de type streamer puisse être obtenu. Après avoir décrit le principe de développement du streamer à partir d'un seul électron qui ionise suffisamment le gaz pour que la charge d'espace créée localise le champ électrique, les solutions mises en place pour éviter la formation de streamer seront explicitées. Les microdécharges tout comme les décharges de Townsend et luminescente, obtenues lorsque la durée de la décharge est courte comparée à la période de l'excitation, seront détaillées. Ensuite, les conséquences de l'augmentation de la fréquence d'excitation du plasma jusqu'au régime radio fréquence ou de surtension comme dans le cas des décharges nano-impulsionnelles répétitives seront décrites. Le principe de fonctionnement et les caractéristiques de ces

différentes décharges seront donnés ainsi que les conséquences sur l'excitation et la chimie du plasma. Tout au long de l'exposé, les points spécifiques à la pression atmosphérique seront mis en exergue.

L'étude de la décharge est une condition nécessaire, mais non suffisante pour aboutir à une application. Le réacteur dans lequel cette décharge est réalisée conditionne aussi grandement l'efficacité du procédé et la qualité du produit. L'optimisation du réacteur à pression atmosphérique doit tenir compte du faible parcours moyen des espèces réactives. Le dépôt de couches minces, PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) par plasma à la pression atmosphérique étant en plein essor ⁵... l'importance de paramètre comme la géométrie du réacteur ou la forme de l'excitation du plasma sera illustré sur la base d'un cas spécifique de dépôt de couche: le dépôt de nitrure de silicium hydrogéné, couche antireflet et passivante de la face avant de cellule silicium cristallin. Cet objectif final sera traduit en termes de propriétés physiques et chimiques de la couche afin d'expliquer l'effet des paramètres du procédé sur les propriétés du dépôt, montrant la démarche suivie pour obtenir une couche mince ayant des propriétés finales définies. Le rendement du procédé étant défini par la vitesse de dépôt, les conséquences de la pression atmosphérique sur ce paramètre seront discutées.

Références

- [1] U. Kogelschatz, 2003, Plasma Chem. Plasma Process., 23, 1.
- [2] A. Fridman, Plasma Chemistry, Cambridge University Press, New York, 2008.
- [3] K. Hassouni, F. Massines, J. M. Pouvesle, Plasmas Froids : Génération, Caractérisation et Technologies, Ed des Presses de Saint Etienne, 2004.
- [4] F. Massines, N. Gherardi, N. Naudé, P. Ségur, 2009, Eur. Phys. J. Appl. Phys., 47, 22805.
- [5] F. Massines, C. Sarra-Bournet, F. Fanelli, N. Naude, N. Gherardi, 2012, Plasma Process. Polym., 9, 1041-1073.
- [6] M. Laroussi, T. Akan, 2007, Plasma Process. Polym., 4, 777.
- [7] T. Belmonte, G. Henrion, T. Gries, 2011, J. Thermal Spray Technol., 20, 744.
- [8] D. Merche, N. Vandencastele, F. Reniers, 2012, Thin Solid Films 520, 4219-4236.