

Plasma radiofréquence pour la microélectronique

Pascal Chabert

*Laboratoire de Physique des Plasmas, CNRS, Ecole Polytechnique, UPMC, U. Paris Sud,
91128 Palaiseau, France*

mél: pascal.chabert@lpp.polytechnique.fr

Introduction

Les plasmas froids ne sont que faiblement ionisés; ils sont donc majoritairement constitués de molécules et d'atomes (neutres) avec une faible fraction d'ions et d'électrons. Ils sont entretenus par une source d'énergie électrique, dont la gamme de fréquences varie de zéro (source continue) à plusieurs GHz (source micro-onde); la puissance injectée est en général inférieure à 1 Wcm^{-3} . L'extension spatiale du plasma est limitée par les parois du réacteur, qui peuvent être conductrices ou isolantes, au voisinage desquelles s'établissent des zones de charge d'espace positive appelées gaines, où le champ électrique se localise. Les ions positifs sont accélérés vers les parois alors que les électrons sont au contraire partiellement confinés.

Les gaines constituent le premier atout des plasmas pour le traitement des matériaux : elles permettent la conversion d'une partie de l'énergie électrique fournie au plasma en énergie cinétique transférée aux ions. Les ions frappent la surface à traiter, ainsi que les parois du réacteur, avec l'énergie cinétique acquise dans la gaine. L'échelle d'énergie du bombardement ionique, de quelques eV à plusieurs milliers d'eV, autorise une très grande diversité de traitement des matériaux par plasma.

Le deuxième avantage majeur des plasmas froids réside dans la conversion, à température ambiante, de l'énergie électrique en énergie chimique. Les plasmas froids sont en général hors équilibre thermodynamique local, c'est à dire que les températures des différentes espèces du plasma sont très inégales. En particulier, la température des électrons est typiquement comprise entre 3 et 5 eV ($1 \text{ eV} = 11600 \text{ K}$), alors que la température des espèces neutres et des ions du plasma est voisine de 300 K. L'essentiel de l'énergie électrique est donc transféré aux électrons qui excitent, ionisent et dissocient le gaz moléculaire en espèces réactives. Les plasmas froids génèrent donc simultanément des radicaux réactifs à température ambiante et des ions positifs énergétiques, qui peuvent interagir avec les surfaces à traiter.

Le traitement de surface par plasma est présent dans un grand nombre de domaine de l'industrie: la métallurgie (nitruration, cémentation), la biomédecine (stérilisation), l'automobile ou encore l'aérospatial. Mais c'est sans doute dans l'industrie de la microélectronique que l'impact des procédés plasma a été le plus grand. Les couches minces de semi-conducteurs, de métaux, d'isolants ou de résine peuvent être gravées ou déposées par plasma. Les étapes de gravures sont particulièrement cruciales, car la taille des motifs réalisés détermine le niveau d'intégration et les performances en termes de fréquence d'horloge. Ainsi, le formidable développement de la micro-informatique doit beaucoup aux procédés plasma qui ont permis de réaliser des structures de dimensions nanométriques.

Plasmas radiofréquence

Les réacteurs à plasmas utilisés pour le dépôt ou la gravure de couches minces fonctionnent généralement entre 13.56 MHz et 200 MHz, c'est à dire dans le domaine radiofréquence [1]. Ce domaine est particulièrement intéressant car il se situe entre les deux fréquences propres

du plasma ; la fréquence plasma ionique et la fréquence plasma électronique. Comme la densité des électrons et des ions sont égales et que la masse des ions est très supérieure à la masse des électrons, il résulte que $\omega_{pe} \gg \omega_{pi}$. Ainsi le domaine radiofréquence est tel que les électrons du plasma suivent les variations instantanées du champ électrique radiofréquence, alors que les ions ne suivent que le champ électrique moyenné dans le temps.

Les champs électromagnétiques radiofréquence (rf) sont créés par des structures d'excitation allant de deux plaques parallèles métalliques polarisées par une tension rf, à la circulation d'un courant rf dans une bobine séparée du plasma par un diélectrique. Ces champs vont ensuite transférer leur énergie aux électrons par des mécanismes de chauffage qui peuvent être collisionnels ou non-collisionnels. La forme et l'intensité des champs, et donc l'efficacité du chauffage, vont dépendre de la structure utilisée. Les deux types de réacteurs rf utilisés en microélectronique sont : les réacteurs à couplage capacitif (CCP pour Capacitively Coupled Plasmas) et les réacteurs à couplage inductifs (ICP pour Inductively Coupled Plasmas).

A ces deux types de réacteurs (CCP et ICP), sont généralement associés deux modes de couplage de l'énergie : (i) le mode capacitif E (électrostatique), (ii) le mode inductif H (électromagnétique évanescent). Jusqu'à présent, les réacteurs capacitifs fonctionnaient uniquement en mode E. Ce n'est plus le cas aujourd'hui du fait de l'augmentation simultanée de la fréquence d'excitation et de la taille des réacteurs (pour augmenter la productivité). A l'instar des réacteurs inductifs, les réacteurs capacitifs peuvent fonctionner en mode E et en mode H et ils sont soumis à des transitions E-H. Les réacteurs inductifs, peuvent également fonctionner dans les deux modes et sont soumis à des transitions de modes. Des instabilités se développent d'ailleurs au voisinage de ces transitions. Enfin, notons pour conclure qu'il existe également un troisième type de réacteur, les réacteurs hélicons, qui fonctionnent avec un champ magnétique statique. Le plasma est alors chauffé par une onde propagative (l'onde hélicon) d'où l'existence d'un troisième mode appelé W (électromagnétique propagatif). Les réacteurs hélicons sont donc soumis à des transitions E-H-W qui peuvent également être instables.

Plasmas capacitifs multifréquence

Le principe physique du plasma capacitif excité par une simple fréquence (typiquement 13.56 MHz) est présenté sur la figure 1. Le plasma, zone de neutralité électrique, est séparé des électrodes par deux gaines de charge d'espace positives. D'épaisseur constante d , il oscille à la fréquence d'excitation si bien que les deux gaines de charges d'espace, d'épaisseur $s_a(t)$ et $s_b(t)$, se forment et disparaissent alternativement. Le courant rf qui naît de la différence de potentiel imposée entre les électrodes est constant dans tout le circuit, il est donc commode de le prendre comme paramètre de contrôle pour les modèles. Les autres paramètres externes sont: la fréquence d'excitation f , la pression p et enfin l'espace inter-electrodes l . En outre les hypothèses ou approximations suivantes sont souvent vérifiées:

- Les ions ont une inertie telle qu'ils ne répondent qu'au champ moyen : $\omega \gg \omega_{pi}$. La tension moyenne qui se développe dans les gaines de charge d'espace fixe l'énergie avec laquelle les ions impactent les électrodes.
- Les électrons répondent au champ électrique instantané: $\omega \ll \omega_{pe}$. La puissance dissipée par le champ rf sert au chauffage des électrons.
- hypothèse électrostatique: la longueur d'onde et la profondeur de peau sont grandes devant les dimensions caractéristiques du système. La tension rf entre les électrodes est indépendante du rayon. Nous discuterons la validité de cette hypothèse durant l'exposé.

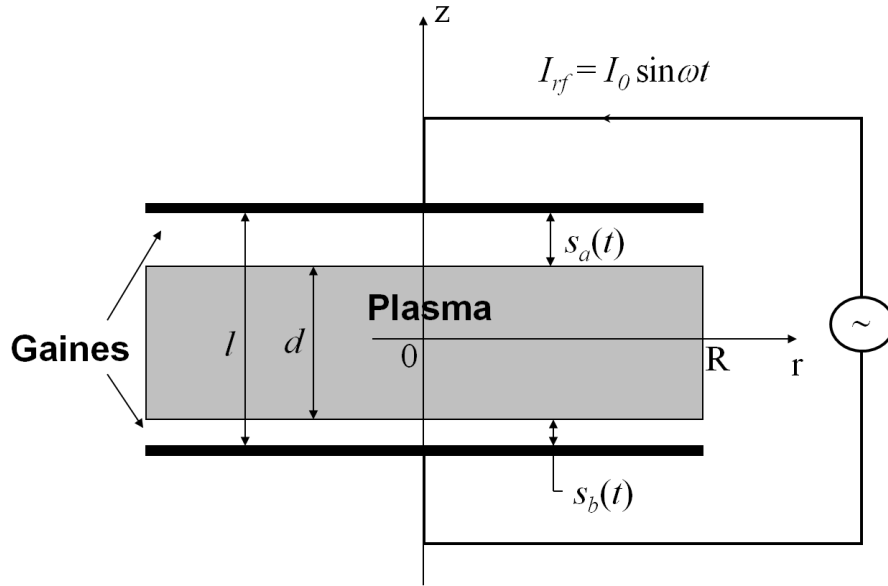


Figure 1: Schéma de la décharge capacitive [1]

Ce système, simple de conception, est le siège de phénomènes complexes. Les gaines de charge d'espace ont une dynamique riche, qui inclue une réponse temporelle non-linéaire (génération d'harmonique) et une absorption de puissance par des mécanismes non-collisionnels (chauffage stochastique). L'essentiel du champ électrique est localisé dans les gaines de charge d'espace, traversées par un courant de déplacement (en première approximation, les gaines se comportent comme des capacités). La conductivité du plasma est elle suffisamment grande pour que les courants de déplacement soient négligeables; le plasma est essentiellement résistif et inductif (du fait de l'inertie des électrons).

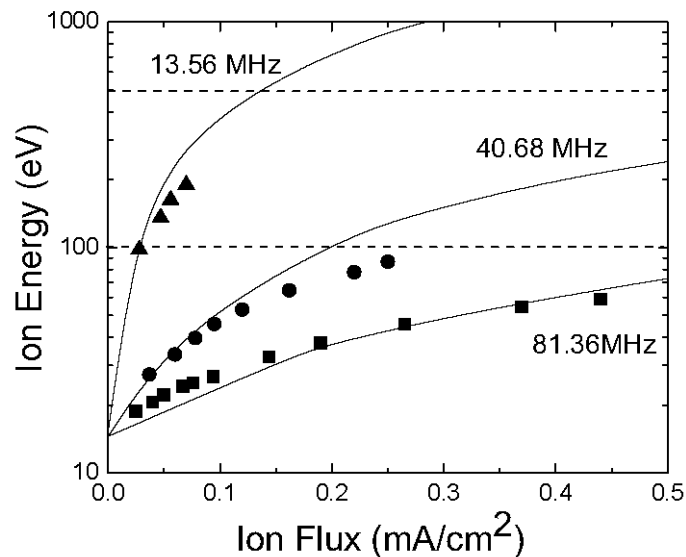


Figure 2: Diagramme Flux/Energie des ions dans une décharge capacitive [2]

L'augmentation du courant rf dans le circuit (ou de la tension rf entre les plaques) entraîne simultanément une augmentation de la densité du plasma et une augmentation de la tension qui se développe aux bornes des gaines de charge d'espace. Par conséquent, pour un système donné (fréquence, espace-interélectrode, pression), le flux des ions (fixé par la densité du plasma, et donc par le courant rf) et l'énergie des ions bombardant les surface (fixé par la tension moyennée dans la gaine) ne peuvent être variés de façon indépendante. Il est possible de calculer le diagramme Flux/Énergie des ions bombardant les électrodes, présenté sur la figure 2. Sur cette figure sont représentés les calculs (lignes) et les mesures expérimentales (symboles), montrant un excellent accord théorie/expérience. Il ressort que les basses fréquences favorisent l'énergie, alors que les hautes fréquence favorisent le flux. Ceci provient simplement du fait que l'impédance des gaines de charge d'espace (essentiellement capacitives) décroît lorsque la fréquence augmente; la tension aux bornes des gaines et donc plus faible à haute fréquence.

Ce diagramme est particulièrement éclairant, car le flux et l'énergie des ions sont deux des trois paramètres clé (le troisième étant le flux des espèces neutres réactives) permettant de qualifier un procédé de gravure. Supposons qu'un procédé requiert des ions d'énergie inférieure à 500 eV pour ne pas endommager le substrat et/ou le masque. A 13.56 MHz, le flux est limité à 0.1 mA/cm² alors qu'il n'a pratiquement pas de limite à 80 MHz. Néanmoins, si ce même procédé requiert des ions d'énergie supérieure à 100 eV pour efficacement activer la gravure, l'excitation à 80 MHz n'est pas adéquate. Finalement, il ressort de ce type d'analyse qu'il est impératif d'utiliser des réacteurs excités par deux fréquences pour obtenir la flexibilité souhaitée. L'espoir est que la haute fréquence contrôlera le flux des ions, alors que la basse fréquence contrôlera leur énergie.

Points abordés lors de la conférence

Lors de la conférence nous allons explorer la physique des plasmas capacitifs excités par plusieurs fréquences sinusoïdales [1,4] et même des formes d'onde arbitraires [6,7]. Les effets électromagnétiques à haute fréquence [2,3,5] seront également détaillés car ils sont à la base d'une perte d'uniformité des procédés qui pose actuellement des problèmes à l'industrie de la microélectronique.

Références

- [1] P. Chabert and N. Braithwaite, *Physics of Radiofrequency Plasmas*, Cambridge University Press (2011)
- [2] A. Perret, P. Chabert, J. Jolly, and J.-P. Booth, *Applied Physics Letters*, **86** (2005) 021501
- [3] P. Chabert, J.-L. Raimbault, P. Levif, J.-M. Rax, and M.A. Lieberman, *Phys. Rev. Lett.* **95** (2005) 205001
- [4] M. M. Turner and P. Chabert, *Phys. Rev. Lett.*, **96** (2006) 205001
- [5] P. Chabert, *J. Phys. D*, Topical Review, **40** (2007) R63-R73
- [6] T. Lafleur, P Chabert, M M Turner and J P Booth, *Plasma Sources Sci. Technol.* **22** (2013) 065013
- [7] MM Turner and P Chabert, *Applied Physics Letters*, (2014) Accepted