

# Plasmas radio-fréquence basse pression : Des sources aux procédés

*Emilie Despiau-Pujo*

*Laboratoire des Technologies de la Microélectronique, Univ. Grenoble Alpes/CNRS/CEA-Leti Minatec  
17 ave des Martyrs, F-38054 Grenoble, France.  
courriel : [emilie.despiau-pujo@cea.fr](mailto:emilie.despiau-pujo@cea.fr)*

Depuis l'invention du transistor en 1947, les technologies de traitement de l'information utilisent largement les dispositifs intégrés sur substrat semi-conducteur. Les circuits intégrés actuels (contenant jusqu'à  $10^9$  transistors sur une même puce) sont constitués d'empilements de matériaux en couches minces - semi-conducteurs, diélectriques ou conducteurs - organisés et interconnectés de manière extrêmement complexe. Dans les procédés de fabrication de tels circuits, les matériaux sont déposés puis gravés dans des décharges plasma basse pression, la taille des motifs réalisés déterminant le niveau d'intégration et les performances en termes de fréquence d'horloge. Ainsi, le formidable essor de la micro-informatique doit beaucoup aux procédés plasma basse pression, qui permettent de réaliser des motifs  $<100$  nm, soit 100 fois plus petits que le diamètre d'un cheveu humain.

Il existe de nombreux plasmas de décharge qui diffèrent par le mode de couplage de l'énergie au gaz, ainsi que par la fréquence d'excitation qui varie du continu au domaine micro-onde. La majorité des systèmes utilisés pour le dépôt ou la gravure en micro-électronique fonctionnent à 13.56 MHz (radiofréquence) ou 2.45 GHz (micro-onde). Le domaine radiofréquence est intéressant car il se situe entre les deux fréquences propres du plasma (fréquences plasma ionique et électronique), de sorte que les électrons du plasma suivent les variations instantanées du champ électrique, alors que les ions ne suivent que le champ électrique moyen. Les puissances injectées étant modestes (en général inférieures à 2000 W), ces plasmas sont majoritairement constitués de molécules et d'atomes neutres, avec une faible fraction (moins de 1%) d'ions et d'électrons. Les gaines (zones de charge d'espace positive à l'interface plasma-parois) constituent un atout pour le traitement des matériaux car elles convertissent l'énergie électrique fournie au plasma en énergie cinétique transférée aux ions. Ces derniers bombardent ainsi les parois et les substrats avec une énergie cinétique pouvant varier de quelques eV à plusieurs centaines d'eV, ce qui permet une grande diversité de traitements des matériaux. Le 2<sup>ème</sup> avantage de ces plasmas réside dans la conversion, à température ambiante, de l'énergie électrique en énergie chimique. Les électrons étant bien plus mobiles que les ions, l'essentiel de l'énergie du champ électrique est ainsi transféré aux électrons (1-5eV) qui excitent, ionisent et dissocient le gaz moléculaire en espèces réactives (300-1000K) pouvant interagir avec les matériaux.

Face à la course à la miniaturisation, les réacteurs plasma doivent répondre à des exigences sans cesse accrues (fortes vitesses de gravure ou de dépôt, anisotropie, sélectivité, uniformité, etc.) tout en supportant des tailles de substrats toujours plus grandes. Outre les considérations géométriques et la fréquence d'excitation, c'est le mode de couplage de la puissance électrique au plasma qui les différencie le plus. Les champs électromagnétiques radiofréquence sont créés par diverses structures d'excitation que nous décrirons dans ce cours. Ils transfèrent leur énergie aux électrons du plasma, la forme et l'intensité des champs – et donc l'efficacité du chauffage des électrons – dépendant de la structure utilisée. Dans l'industrie micro-électronique, deux types de sources RF sont principalement utilisés : les réacteurs à couplage capacitif et ceux à couplage inductif. Le réacteur capacitif standard, constitué de 2 plaques parallèles métalliques polarisées par une tension RF, est alimenté par un générateur simple fréquence (historiquement à 13.56 MHz). L'amplitude de la tension RF appliquée entre les 2

plaques (électrodes) détermine à la fois l'énergie et le flux des ions bombardant le substrat. Cette absence de découplage flux/énergie est une sérieuse limitation des réacteurs capacitifs simple fréquence, c'est pourquoi les industriels se sont tournés vers des réacteurs à double voire triple fréquence. De plus, les réacteurs simple fréquence à 13.56 MHz produisent des plasmas de faible densité ( $\sim 10^9$ - $10^{10}$  cm<sup>-3</sup>). Le réacteur inductif, dans lequel le champ électromagnétique est créé par circulation d'un courant RF dans une bobine séparée du plasma par une fenêtre diélectrique, fonctionne avec deux générateurs. Le 1<sup>er</sup> alimente la bobine séparée du plasma ; le courant circulant dans celle-ci génère le champ induit et sert à contrôler le flux des ions. Le couplage est plus efficace que dans les réacteurs capacitifs et permet d'atteindre des densités supérieures ( $\sim 10^{10}$ - $10^{12}$  cm<sup>-3</sup>). Le 2<sup>ème</sup> générateur alimente le porte-substrat et contrôle l'énergie des ions.

Le fonctionnement et les caractéristiques de ces 2 types de décharges RF seront abordés de manière détaillée dans ce cours. Concernant les décharges capacitives, on insistera notamment sur l'influence de la fréquence d'excitation sur la tension dans les gaines, la densité électronique, le flux ou la fonction de distribution en énergie des ions. Dans les réacteurs inductifs, les particularités liées à l'existence de 2 modes de couplage énergie/plasma – le mode capacitif E (électrostatique) et le mode inductif H (électromagnétique évanescent) – et aux instabilités associées seront également discutées. Une dernière partie sera enfin consacrée aux interactions plasma-surface et aux procédés de gravure dans les plasmas RF basse pression.