

Plasmas micro-onde basse pression et procédés associés

Stéphane Béchu, Alexandre Bès, Ana Lacoste

LPSC, Université Grenoble Alpes, CNRS/IN2P3, 53 rue des Martyrs, 38026, Grenoble cedex, France.

Les plasmas entretenus par micro-ondes ($f > 0.3$ GHz) bénéficient d'un certain nombre d'avantages communs aux plasmas excités à plus basses fréquences (ICP, Hélicon) comme, par exemple, l'absence d'électrodes actives en contact avec le plasma (absence de bombardement non-intentionnel des surfaces) et les fortes densités qui peuvent être obtenues. Toutefois, d'autres avantages intrinsèques au domaine des micro-ondes peuvent être soulignés comme, en particulier, la stationnarité de la fonction de distribution en énergie des électrons qui a une conséquence directe sur le rendement énergétique et la cinétique des processus de production d'espèces dans ce type de décharges. Egalement, le fonctionnement à la résonance cyclotronique électronique (RCE) favorise le maintien d'un plasma micro-onde de forte densité à des pressions nettement plus faibles que celles autorisées dans tout autre type de décharge. Du point de vue technique, la polarisation (DC, RF) des substrats est indépendante de la production du plasma et, contrairement aux décharges RF, elle n'affecte pas l'accord d'impédance du système.

La présentation vise principalement les décharges micro-onde basse pression pour lesquelles la fréquence de collisions est souvent inférieure à la pulsation de l'onde ($\nu < \omega$). Cette relation est plutôt défavorable au couplage et au transfert efficace d'énergie de l'onde aux électrons par mécanisme collisionnel. Toutefois, le domaine des basses pressions représente une condition *sine qua non* pour la réalisation des procédés dits de grandes dimensions (surface ou volume) et, dans ce cas, des questions relatives aux mécanismes d'absorption de la puissance, aux modes et à l'efficacité de couplage de l'onde au plasma se posent de manière récurrente.

Dans ce contexte, après un court rappel sur les conditions de propagation d'une onde électromagnétique dans un plasma, différents types de couplage seront présentés et discutés au travers d'exemples concrets de configurations de décharges mises en œuvre pour la réalisation de plasmas de grandes dimensions. Selon les longueurs sur lesquelles l'absorption de la puissance est effectuée par rapport à la longueur d'onde, les sources plasma micro-ondes peuvent être classées en deux catégories génériques: sources à absorption étendue et à absorption localisée.

Dans le premier cas, le plasma est soutenu par la propagation d'une onde de surface (liée de manière auto-cohérente à la densité du plasma) et, lorsque l'excitation du plasma est effectuée à travers plusieurs ouvertures (fentes), la distribution de ces fentes est nécessairement liée aux longueurs caractéristiques de l'onde (propagative ou stationnaire). L'onde de surface conditionne donc l'extension du plasma sur des grandes longueurs ou surfaces et, dans la plupart des dispositifs basés sur ce principe, l'excitation du plasma est obtenue à partir d'un excitateur commun, généralement un guide d'onde (linéaire ou circulaire) ou un surfatron.

Dans la deuxième catégorie, il s'agit d'une absorption de la puissance micro-onde sur des distances inférieures à la longueur d'onde (absorption localisée). Dans ce cas, l'obtention des plasmas de grandes dimensions implique nécessairement l'utilisation de plusieurs excitateurs distribués, selon le procédé souhaité, en réseaux de 1 à 3 dimensions. Chaque excitateur (ou applicateur d'onde), conçu sur le principe d'un propagateur coaxial avec une terminaison ouverte, constitue une source plasma unitaire (élémentaire), le plasma étant obtenu dans le plan terminal de l'applicateur. Bien que dans certaines conditions opératoires (pression et puissance), conduisant à

des densités supérieures à la densité critique, une onde de surface se développe, la particularité de ce type de sources repose sur l'absence de corrélation entre la distribution des applicateurs et la longueur d'onde. Autrement dit il n'y a pas de couplage électromagnétique entre les applicateurs d'onde ou encore, la formation d'une onde de surface au niveau d'un excitateur ne conditionne pas l'amorçage et le maintien du plasma au niveau d'un autre excitateur.

Du point de vue technologique, la réalisation de ces dispositifs doit nécessairement prendre en compte les aspects de couplage onde / plasma et, une attention particulière est accordée à l'efficacité du transfert de puissance de l'applicateur d'onde (guide, coax) au plasma. Dans ce sens, la présentation abordera quelques aspects physiques et technologiques portant notamment sur l'adaptation de l'impédance de l'applicateur à l'impédance du plasma, le rayonnement résiduel et le phénomène d'hystérésis.

Egalement, basé sur des exemples ciblés de dispositifs de production des plasmas micro-onde basse pression; les différents mécanismes de chauffage des électrons du plasma seront présentés et, en particulier, les mécanismes résonants sur lesquels repose notamment le maintien d'un plasma micro-onde basse pression : résonance plasma (Landau), résonance inférée par la présence d'un champ magnétique (UHR – *upper hybrid resonance*, ECR,...). En effet, l'extension du domaine de pression des plasmas micro-onde vers des valeurs inférieures à la centaine de millitorrs n'est possible que par l'association d'un champ magnétique qui, en plus de son rôle de confinement, peut satisfaire la condition RCE permettant ainsi un chauffage des électrons d'autant plus efficace que la pression est faible.

Quelques exemples de procédés compléteront cette présentation afin de mettre en évidence les avantages propres aux décharges micro-ondes.