Avis de Soutenance

Madame Elane KOUADOU

Physique

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés
Conception et Analyse de Micro-Réacteurs Plasma à Géométrie Traversante en Silicium : Étude des Propriétés Électriques et Optiques

Travaux dirigés par Monsieur Rémi DUSSART

Ecole doctorale : Energie, Matériaux, Sciences de la Terre et de l'Univers - EMSTU
Unité de recherche : GREMI - Groupe de Recherches sur l'Energie des Milieux Ionisés

Soutenance prévue le ***mardi 01 décembre 2026*** à 14h00
Lieu : 14 rue d'Issoudun BP 6744, GREMI, 45067, Orléans
Salle : Grande de reunion, GREMI

Composition du jury proposé

M. Rémi DUSSART	Professeur	GREMI, Université d'Orléans	Directeur de thèse
M. Katir ZIOUCHE	Professeur	IEMN, Université de Lille	Rapporteur
M. Grégory MARCOS	Ingénieur de recherche	IJL, Université de Lorraine	Rapporteur
M. Gilles CUNGE	Directeur de recherche	LTMLab, Université Grenoble Alpes	Examinateur
M. Dunpin HONG	Professeur	GREMI, Université d'Orléans	Examinateur
Mme Stéphanie OGNIER	Maîtresse de conférences	IRCP, Sorbonne Université	Examinatrice
M. Arnaud STOLZ	Maître de conférences	GREMI, Université d'Orléans	Co-encadrant de thèse
M. Sylvain ISENI	Chargé de recherche	GREMI, CNRS	Co-encadrant de thèse

Mots-clés : Microdécharge, Microplasma, Salle blanche, Micro-fabrication, Silicium, OES

Résumé :

L'objectif de cette thèse est de développer des micro-réacteurs plasma à base de silicium et d'étudier l'influence d'une géométrie traversante sur les propriétés électriques et optiques de microdécharges alimentées en courant continu (DC). Les dispositifs ont été fabriqués en salle blanche en utilisant des technologies de micro- et nanofabrication couramment employées dans les différents domaine de la microélectronique. Les réacteurs réalisés à partir de substrat de silicium, comportant une couche diélectrique de SiO2 d'environ 6 µm et des électrodes en métal, ici principalement du Nickel, d'environ 600 nm d'épaisseur. Deux architectures principales ont été développées et comparées : un réacteur à cavité fermée obtenu par gravure isotrope du silicium, et un réacteur à géométrie traversante dans lequel la cavité est prolongée par un via anisotrope profond appelé Through-Silicon Via (TSV). Les micro-réacteurs ont été étudiés dans l'hélium en conditions statiques, pour des pressions comprises entre environ 150 mbar et 1 bar et des courants de décharge allant jusqu'à environ 4 mA. Des mesures électriques, de l'imagerie rapide et de la spectroscopie d'émission optique ont été combinées afin de caractériser la tension de claquage, les caractéristiques courant-tension, les régimes de décharge, les instabilités auto-impulsionnelles, la répartition spatiale de l'émission lumineuse, la température du gaz et la densité électronique. La géométrie TSV modifie significativement les conditions d'allumage. Sur l'ensemble de la gamme de pressions étudiée, les réacteurs traversants présentent des tensions de claquage plus faibles que les dispositifs à cavité fermée et, au-delà d'environ 400 mbar, un comportement d'allumage en deux étapes est observé, suggérant un développement séquentiel de la décharge dans la cavité isotrope puis dans le via anisotrope. La transition entre le régime auto-impulsionnel et le fonctionnement continu dépend également fortement de la géométrie du réacteur et de la pression. Dans les cavités fermées, le courant nécessaire à la disparition du régime auto-impulsionnel augmente progressivement avec la pression, tandis que les réacteurs TSV présentent une évolution non monotone, avec un minimum à pression intermédiaire. Bien que le courant moyen de décharge reste de l'ordre du milliampère, des pics de courant transitoires de plusieurs centaines de milliampères, pouvant dans certaines conditions approcher 1 A, ont été mesurés lors des événements de réamorçage. L'imagerie rapide montre qu'une augmentation de la pression conduit à une localisation plus marquée de l'émission lumineuse suivant l'axe du via dans les réacteurs TSV, tandis que l'émission reste répartie sur une fraction plus importante de la cavité dans les réacteurs fermés. Les mesures spectroscopiques conduisent à des températures de gaz typiquement comprises entre 500 et 700 K selon la géométrie et le régime de décharge. L'élargissement Stark des raies de Balmer de l'hydrogène conduit à des estimations de densité électronique dans la gamme 1014 - 1015 cm−3, bien que la présence de profils spectraux complexes et spatialement variables mette en évidence les limites d'une analyse reposant sur un simple profil de Voigt dans ces plasmas

fortement confinés. Enfin, les observations réalisées après fonctionnement répétés, révèlent des dégradations localisées, en particulier au voisinage des bords du TSV et des électrodes.

Summary:

The objective of this thesis is to develop silicon-based plasma microreactors and to investigate the influence of a through-silicon geometry on the electrical and optical properties of direct-current (DC) microdischarges. The devices were fabricated in a cleanroom using micro- and nanofabrication technologies commonly employed in various fields of microelectronics. The reactors were fabricated from silicon substrates with a SiO2 dielectric layer approximately 6 µm thick and metal electrodes, mainly nickel in this work, approximately 600 nm thick. Two main architectures were developed and compared : a closed-cavity reactor obtained by isotropic etching of silicon, and a through-silicon reactor in which the cavity is extended by a deep anisotropic via referred to as a Through-Silicon Via(TSV). The microreactors were investigated in helium under static conditions, at pressures ranging from approximately 150 mbar to 1 bar and discharge currents of up to approximately 4 mA. Electrical measurements, high-speed imaging, and optical emission spectroscopy were combined to characterize the breakdown voltage, current-voltage characteristics, discharge regimes, self-pulsing instabilities, spatial distribution of the optical emission, gas temperature, and electron density. The TSV geometry significantly modifies the ignition conditions. Over the entire pressure range investigated, the through-silicon reactors exhibit lower breakdown voltages than the closed-cavity devices and, above approximately 400 mbar, a two-step ignition behavior is observed, suggesting a sequential development of the discharge first within the isotropic cavity and then within the anisotropic via. The transition between the self-pulsing regime and continuous operation also depends strongly on the reactor geometry and pressure. In the closed cavities, the current required for the disappearance of the self-pulsing regime progressively increases with pressure, whereas the TSV reactors exhibit a non-monotonic evolution, with a minimum at intermediate pressure. Although the average discharge current remains on the order of a milliampere, transient current peaks of several hundred milliamperes, which under certain conditions can approach 1 A, were measured during re-ignition events. High-speed imaging shows that increasing the pressure leads to a stronger localization of the optical emission along the via axis in the TSV reactors, whereas the emission remains distributed over a larger fraction of the cavity in the closed-cavity reactors. Spectroscopic measurements yield gas temperatures typically ranging from 500 to 700 K, depending on the reactor geometry and discharge regime. Stark broadening of the hydrogen Balmer lines leads to electron-density estimates in the range of 1014 - 1015 cm−3, although the presence of complex and spatially varying spectral profiles highlights the limitations of an analysis based on a simple Voigt profile in these strongly confined plasmas. Finally, observations performed after repeated operation reveal localized degradation, particularly near the TSV edges and the electrodes.