

## Caractérisation et modélisation de MIMOSIS: un capteur à pixels actifs monolithique basé sur la technologie CMOS

H. Darwish

Les progrès dans le domaine de la physique des ions lourds sont stimulés par des avancées continues dans l'instrumentation et les détecteurs de particules. Ces technologies sont essentielles pour tester des concepts physiques nouveaux ou améliorés. Cette thèse a été réalisée dans le cadre du projet MIMOSIS CMOS Monolithic Active Pixel Sensor. MIMOSIS est conçu comme un capteur de détection de particules chargées destiné à équiper le Micro Vertex Detector (MVD) de l'expérience Compressed Baryonic Matter (CBM), actuellement en construction sur l'installation accélérateur FAIR à Darmstadt, en Allemagne.

CBM est une future expérience d'ions lourds à cible fixe, conçue pour explorer le diagramme de phase de la QCD dans la région des hautes densités baryoniques nettes et des températures modérées. Elle complétera les études menées par les collaborations STAR et ALICE en utilisant les faisceaux intenses de protons et d'ions lourds fournis par FAIR. Une variété d'espèces ioniques sera disponible à des énergies allant de 2 à 11 AGeV, avec des taux de collision allant jusqu'à  $10^7$  par seconde. Ces faisceaux de haute qualité s'accompagnent de la construction de détecteurs de haute précision.

CBM comporte plusieurs sous-systèmes, parmi lesquels le Micro Vertex Detector (MVD) est le premier détecteur en aval de la cible. Le MVD est situé sous vide dans l'aimant dipolaire de CBM. Il se compose de quatre stations planes accueillant environ 300 capteurs MIMOSIS. Le détecteur est conçu pour supporter des faisceaux d'ions lourds et de protons à des taux allant jusqu'à 100 kHz pour les collisions Au+Au et 10 MHz pour les interactions p+A. Sa fonction principale est de distinguer les sommets de collision primaires des sommets secondaires provenant de particules à durée de vie brève. En outre, il contribue au suivi des particules de faible impulsion en combinaison avec d'autres détecteurs de trajectoire.

Les objectifs physiques du MVD et son environnement opérationnel imposent des exigences extrêmement strictes aux capteurs MIMOSIS. Chaque capteur doit combiner des résolutions spatiale et temporelle de 5  $\mu\text{m}$  et 5  $\mu\text{s}$ , respectivement, tout en étant aminci à environ 50  $\mu\text{m}$  de silicium. Il doit également gérer un taux de données maximal allant jusqu'à 700 kHz/mm<sup>2</sup>, avec une occupation non uniforme conduisant à des gradients spatiaux intégrés atteignant 100 %.

De plus, les capteurs doivent supporter des doses d'ionisation totale (TID) allant jusqu'à 5 MRad et des fluences NIEL jusqu'à  $7 \times 10^{13}$  neq/cm<sup>2</sup>, tout en maintenant leurs performances jusqu'au moment prévu de leur remplacement. Par ailleurs, le capteur doit être capable de tolérer des impacts d'ions lourds résultant d'éventuelles erreurs de pilotage du faisceau, d'ions du halo du faisceau, et de fragments nucléaires provenant de la cible. Ces derniers sont estimés produire des valeurs de LET (Linear Energy Transfer) allant jusqu'à 35 MeV·cm<sup>2</sup>/mg.

Ces conditions exigent que le capteur soit durci contre les Single Event Effects (SEE), tels que les latch-ups et les inversions de bits. Une faible consommation énergétique, inférieure à 100 mW/cm<sup>2</sup>, est requise, et le capteur doit fonctionner de manière fiable dans une plage de températures allant de -40 à 30 °C, avec un gradient allant jusqu'à 5 K sur sa surface. La dissipation thermique sera assurée par conduction vers un dissipateur externe via des structures de support en TPG/CVD-diamond.

Le projet de développement du capteur MIMOSIS est une collaboration entre l'IPHC-Strasbourg, le GSI-Darmstadt et l'Université Goethe de Francfort. Le projet est structuré en quatre phases de prototypage : MIMOSIS-0, 1, 2 et 3. Cette thèse s'inscrit dans le cadre des tests des deux prototypes à grande échelle, MIMOSIS-1 et MIMOSIS-2. Ces deux capteurs comportent 1024 × 504 pixels avec un pitch d'environ 27 × 30 μm<sup>2</sup>. Chaque puce offre une zone active d'environ 3,1 × 1,3 cm<sup>2</sup>, en plus de l'électronique front-end numérique intégrée sur le même substrat.

MIMOSIS-1 propose 12 combinaisons différentes de types de pixel, réalisées à l'aide de trois procédés de fabrication distincts. Pour chaque procédé, le capteur comporte quatre matrices de pixels distinctes, chacune implémentant une variante de pixel dotée d'une électronique de nœud de détection spécifique. Dans le prototype suivant, MIMOSIS-2, l'un des procédés de fabrication a été écarté, et de nouveaux capteurs dotés d'une couche épitaxiale de 50 μm ont été introduits en parallèle des couches existantes de 25 μm. L'une des variantes de pixel dans chaque prototype est dérivée du capteur ALPIDE, développé pour l'ALICE-ITS2, tandis que les autres conceptions ont été modifiées spécifiquement pour optimiser les performances du capteur.

Les tests de MIMOSIS-1 et MIMOSIS-2 ont été réalisés avec divers faisceaux de particules au CERN, à DESY et à COSY, couvrant à la fois des puces irradiées et non irradiées. Ces campagnes de tests ont d'abord validé l'ensemble de la chaîne de détection et de traitement du signal. Les tests ont confirmé que les deux capteurs fournissaient des pixels conformes aux exigences du CBM-MVD. Deux variantes de pixel ont été identifiées comme les meilleures candidates pour la version finale du capteur, offrant les meilleures performances globales. Tout cela a été déterminé en tenant compte de la dépendance de chaque variante aux paramètres de pilotage et aux conditions opérationnelles, tels que les tensions de polarisation appliquées et les seuils de discrimination du signal. Toutes les évaluations ont été réalisées dans des conditions où chaque propriété de performance était influencée par d'autres et en compétition avec elles sur de nombreux degrés de liberté. Le processus de sélection était donc intrinsèquement complexe et nécessitait l'identification du meilleur compromis entre ces caractéristiques concurrentes.

En outre, une première étape a été franchie dans la mise à jour du modèle de simulation du capteur, nécessaire pour les simulations de détecteur basées sur GEANT utilisées dans CBM. Cela a été réalisé en utilisant le framework Allpix<sup>2</sup>, qui a fourni l'entrée au framework de simulation dédié de CBM, nommé CBMRoot. Une partie importante de CBMRoot modélise la numérisation du signal dans les sous-détecteurs de CBM. Pour le MVD, il repose sur le modèle de réponse du détecteur développé dans le passé à partir de données de tests en faisceau

obtenues avec les capteurs plus anciens, appelés MIMOSA. Celui-ci est considéré comme obsolète pour MIMOSIS, car il est fabriqué avec un procédé complètement différent et présente une physique du dispositif nouvelle. La propagation de charge dans le pixel est modifiée en raison du changement de déplétion du pixel et du champ électrique. De plus, la sortie binaire de MIMOSIS rend difficile la mesure et la paramétrisation de la réponse du capteur, contrairement à la sortie analogique de MIMOSA.

La création, la propagation et la collecte de charge dans le volume du pixel à partir des premiers principes a été simulé par Allpix<sup>2</sup>. La propagation et la collecte reposaient sur les cartes de champ électrique et de concentration de dopage importées des simulations de dispositif TCAD, basées sur un modèle d'ingénierie détaillé du capteur MIMOSIS. La première étape de la simulation visait à comparer les résultats de la chaîne de simulation complète aux résultats des tests en faisceau, en particulier la distribution de la taille des amas. Après validation, le modèle de numérisation a été obtenu dans une étape suivante de la manière suivante.

Une quantité définie de porteurs de charge a été artificiellement déposée dans le volume actif du capteur. Le volume 3D du pixel a été scanné et des porteurs de charge ont été déposés dans  $30 \times 30 \times 30$  points équidistants, séparés d'environ  $1 \mu\text{m}$  dans chaque dimension. Une matrice de  $3 \times 3$  pixels a été étudiée, le pixel central servant de point de dépôt. L'efficacité de collecte de charge (CCE) de chacun des 9 pixels a été calculée en fonction de la position de dépôt. La visualisation des cartes de CCE et de leur dépendance à la variation de la position de dépôt a montré des performances conformes aux attentes pour nos types de capteurs. Ces valeurs de CCE en fonction de la position de dépôt ont été stockées dans une table de correspondance implémentée dans CBMRoot. Des tests au sein de CBMRoot, incluant l'ensemble de sa chaîne de simulation, sont prévus afin de valider notre modèle. Bien que les résultats de la simulation Allpix<sup>2</sup> reproduisent correctement les résultats expérimentaux, l'évaluation comparative de la version CBMRoot du modèle n'a pas pu être achevée dans le délai de cette thèse de doctorat et restera l'objet d'études futures.