
Contribution aux exercices de prospective nationale 2020-2030

Détecteurs et instrumentation associée

DEPLETED MONOLITHIC ACTIVE PIXEL SENSOR

Auteur principal

Nom : Patrick Pangaud

Affiliation : CPPM - Marseille

Email et coordonnées : pangaud@cppm.in2p3.fr 04.91.82.76.44

Co-auteurs (inclure aussi les collaborateurs internationaux si existants)

CPPM : Marlon Barbero, Pierre Barrillon, Patrick Breugnon, Stéphanie Godiot, Amr Habib

CERN : Walter Snoeys ; Heinz Pernegger

Université de Bonn : Norbert Wermes

IRFU : Philippe Schwemling

KIT : Ivan Peric

RD50 collaboration : Eva Vilella Figueras

*Contribution à rédiger en français ou en anglais et à envoyer à PROSP2020-GT08-COPIL-L@IN2P3.FR
avant le **1^{er} novembre 2019***

1. Informations générales

Titre : DEPLETED MONOLITHIC ACTIVE PIXEL SENSOR

Acronyme : DeMAPS

Résumé

Les DeMAPS sont une nouvelle approche d'une électronique de lecture à pixels dont le concept réside dans l'utilisation de technologies submicroniques Haute-Tension pour lesquelles le pixel n'est plus hybride mais intègre son capteur directement avec l'électronique. Les DeMAPS permettent la collection de charge par drift et minimisent ainsi la sensibilité aux radiations ionisantes. La perspective d'utilisation de cette technologie est pour le post-ITk de ATLAS, mais aussi pour les applications dans les futurs détecteurs auprès des prochains accélérateurs (e-/e+, FCC, CEPC, etc).

Préciser le domaine technologique (plusieurs choix possibles)

- Détecteurs semi-conducteurs (Si, Ge, HgCdTe, Diamant...)
- Photo-détecteurs (SiPM, PMT...)
- Micro-électronique, Electronique Front End
- Acquisition de données, Temps réel

Préciser la motivation principale de recherche visée par la contribution :

- R&D Trajectographe
- R&D Identification de particules
- R&D Détection de gammas
- R&D Détecteurs imagerie médicale

2. Description des objectifs scientifiques et techniques

Le CPPM en collaboration avec d'autres partenaires (Université de Bonn, CERN, IRFU, KIT) a travaillé avec succès au cours des six dernières années dans la conception des pixels monolithiques déplétés dits DeMAPS (dans le cas de l'upgrade Phase II de ATLAS). Les DeMAPS sont une nouvelle approche d'une électronique de lecture à pixels dont le concept réside dans l'utilisation de technologies submicroniques Haute-Tension ayant des caissons d'isollements de 2 ou 3 niveaux (appelé DeepNwell ou DeepPwell). Cette particularité favorise l'isolement de l'électronique de lecture de la partie capteur. En effet, la partie capteur qui correspond au substrat faiblement dopé, peut recevoir une tension importante ($>100V$), afin de créer une zone déplétée sous le pixel. Cette zone qui peut être amincie en dessous de $100\mu m$ favorise la collection de charge par drift et minimise la sensibilité aux radiations ionisantes. Ainsi, le pixel n'est plus hybride et intègre son capteur directement dans l'électronique. Le challenge dans l'utilisation de ces nouvelles technologies est donc de garder une bonne tenue aux irradiations, d'essayer de réduire la taille des pixels et de garder de bonnes performances électroniques.

Les études passées montrent déjà que les DeMAPS permettent la conception d'un module plus simple que pour les technologies hybrides, une réduction de matière, avec un coût réduit de fabrication car le modèle de production est potentiellement simplifié (pas d'hybridation) et une très bonne reproductibilité.

La preuve de concept a déjà été réalisée à partir de trois technologies (AMS $0,18\mu m$, TowerJazz $0,18\mu m$ et LFoundry $0,15\mu m$). Des démonstrateurs de grandes tailles ($10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$) avec des pixels de taille allant de $250\mu m \times 50\mu m$ à $36,4\mu m \times 36,4\mu m$ ont pu montrer leurs efficacités de détection ($>98\%$) après des doses d'irradiations autour de 100Mrads et $2 \cdot 10^{15}\text{ neq/cm}^2$ avec un système de lecture rapide de l'ordre de 40Mhz .

Les DeMAPS semblent offrir la solution la plus avancée et la plus intéressante du point de vue scientifique pour les futurs détecteurs de pixels. La perspective à long terme est d'offrir cette nouvelle technologie pour le post-ITK d'ATLAS, mais aussi pour les applications pour les futurs détecteurs auprès des prochains accélérateurs (e-/e+, FCC, CEPC etc). Des utilisations marginales comme pour l'imagerie médicales sont aussi à l'étude.

Les précédentes études sur ce type de technologies, montrent que nous arrivons à une limite physique en termes de réduction de la taille des pixels ainsi que pour l'utilisation de fonctionnalités numériques (densité d'intégration par pixel trop réduite). Nous devons à présent prospecter de nouvelles technologies autour de 65nm qui devront répondre aux exigences des expériences du futur (tenue aux radiations, détection rapide des particules en dessous de la ns, taille de pixel inférieur à $20 \times 20\mu m^2$, électronique très rapide de lecture des circuits $\sim \text{Gbits}$, etc) ...

Ces développements ont eu pour support le projet européen STREAM ainsi que AIDA (H2020), et font l'objet de plusieurs lettres d'intention dans AIDA++ (structure des work package correspondants en cours de définition).

3. Livrables associés, calendrier et budget indicatifs

Nous proposons deux étapes :

- 1) Continuer à développer des circuits DeMAPS facile d'utilisation avec les technologies actuelles et en collaboration avec nos partenaires historiques (grande matrice avec lecture complète des pixels et système de test dédié).
 - Optimisation des circuits actuel en technologies 180 µm/150 µm en développant les fonctionnalités nécessaires à l'autonomie complète des circuits : Système d'alimentation série, BandGap, PLL, sérialiser haut débit, ports d'entrées/sortie GigaBits, ainsi que toute la partie numérique permettant à ces circuits le traitement internes des données. Ces étapes reposent sur des simulations, la réalisation et le test sous irradiations de blocs fonctionnels dans le cadre des différents process. Les tests et qualification sous environnement radiatifs permettent de vérifier la compatibilité des différents blocs avec les niveaux de dose prévus dans les futurs upgrades. Des simulations TCAD (process physique) sont aussi obligatoires afin de valider le design des pixels, en tenant compte des contraintes sous radiations ionisantes.
 - Les partenaires industrielles seront les mêmes à savoir AMS ou TSI, TowerJazz et LFoundry. La société IBS (Ion Beam Service) sera probablement sollicité sur le traitement final des wafers.
 - Nous pouvons planifier un an de travail avec un budget global d'environ 100k€ (à répartir entre partenaires), dont 10k€ pour les tests et missions (PCB, composants, site d'irradiations)
- 2) Explorer la possibilité d'accéder à des technologies de plus petite taille que l'actuelle 150nm/180nm afin de permettent d'utiliser à l'avenir des capteurs plus résistants aux radiations acceptant un plus grand débit de détection. Ceci permettra aussi d'obtenir des pixels encore plus petits avec une plus grande densité électronique, en accord avec la tendance générale de l'électronique CMOS submicronique.
 - Prospection sur des nouvelles technologies répondant aux exigences des circuit DeMAPS. Cible : trouver des technologies inférieures aux nœuds 180 nm/ 150 nm qui devront répondre aux exigences de la tenue aux radiations jusqu'à 500Mrads et 10^{16} neq/cm², favorisant des pixels de petites tailles (< 20×20µm²) et avec une efficacité de détection dans le capteur >99% après irradiations. Cela implique une étude très poussée aussi bien sur les composants électroniques (transistors et portes logiques), que sur la technologie elle-même (simulation TCAD). Des prototypes devront être réalisées contenant des blocs fonctionnels ainsi que des matrices de pixels de petites tailles, et devront être qualifiées sous irradiations. Evidemment ces prototypes devront répondre aux cahiers de charges des futurs détecteurs et éventuellement un démonstrateur taille réel devra être envisagé en fonction de l'expérience ciblée.
 - Nous pouvons déjà envisager un partenariat avec TowerJazz qui offre une technologie à 65nm (contacts initiaux avec le CERN et l'Université de Bonn dans ce contexte), mais d'autres partenaires pourraient être envisagés.
 - Entre trois et quatre ans seront nécessaire afin de bien qualifier la technologie choisie. Avec une prédiction du budget total autour de 900k€ (à répartir entre partenaires), dont une estimation de 80K€/an pour le CPPM (participation à la fabrication des circuits, PCB, composants et test sous sites d'irradiations)

Dans les deux étapes, nous pourrons financièrement nous appuyer sur nos partenaires historiques ainsi que sur les programmes en cours tel que RD50 ou encore les éventuelles aides comme AIDA++.

Une base de 5-6 FTE/an dont 2 (+ 1 PHD) pour le CPPM est envisagée si nous voulons couvrir les différentes technologies et les tests en même temps.

4. Impact

Ces applications pourraient intéresser les synchrotrons ainsi que le domaine biomédical. En effet, la petite taille des pixels serait pertinente sur la finesse et la résolution des images du futur dans ces domaines.

5. Références

1. Technical Design Report for the ATLAS ITk Pixel Detector, 8 décembre 2017.
2. The Monopix chips : Depleted monolithic active pixel sensors with a column-drain read-out architecture for the ATLAS Inner Tracker upgrade.
I Caicedo, M Barbero, P Barrillon, I Berdalovic, S Bhat, C Bispin, ...
Journal of Instrumentation 14 (06), C06006n 2019
3. Design of a HVCMOS pixel sensor ASIC with on-chip readout electronics for ATLAS ITk upgrade.
M Prathapan, P Pangaud, I Peric, M Benoit, F Ehrler, S Pusti, AL Weber, ...
PoS, 074, 2019