

J.-M. Belloir,
C. Virmontois, O. Gilard
Centre national d'études
spatiales (CNES), Toulouse

P. Paillet,
M. Raine
CEA – DAM
Île-de-France

V. Goiffon, C. Durnez, R. Molina, P. Magnan
Institut supérieur de l'aéronautique et
de l'espace (ISAE-SUPAERO), Toulouse

NOUVEAUX CAPTEURS D'IMAGE EN ENVIRONNEMENT RADIATIF : COMPRÉHENSION DES MÉCANISMES DE DÉGRADATION

Les capteurs d'images CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) sont des composants électroniques utilisés pour de nombreuses applications scientifiques, telles que l'observation spatiale ou les expériences de fusion nucléaire. Ces capteurs d'images ont vu leurs performances démultipliées ces dernières années grâce aux avancées incessantes de la microélectronique, et présentent des avantages indéniables (polyvalence, mise en œuvre simplifiée, consommation réduite, etc.) qui les destinent à remplacer les CCD (Coupled Charge Devices). Certains instruments d'observation spatiale, comme le futur rover d'exploration martienne qui sera lancé en 2020, en sont déjà équipés. Toutefois, en environnement spatial ou nucléaire, ces imageurs sont soumis à des flux de particules pouvant rapidement dégrader leurs performances électro-optiques. Ce travail cherche à comprendre la nature des défauts cristallins formés dans les capteurs d'images CMOS lorsqu'ils sont exposés à des neutrons de fusion nucléaire sur les installations Laser Mégajoule ou ITER, ou à des protons de haute énergie dans l'espace.

Les protons, électrons et ions présents dans l'espace ainsi que les neutrons émis lors des expériences de fusion nucléaire peuvent déplacer des atomes dans la structure interne d'un capteur d'images, au cœur du cristal de silicium formant la zone photosensible des pixels (figure 1). Ces effets de déplacement atomique peuvent conduire à la formation de défauts stables, c'est-à-dire d'irrégularités permanentes dans la structure cristalline normalement continue du silicium. Certains de ces défauts stables

introduisent des niveaux d'énergie dans la bande interdite du silicium, entre la bande de valence où les électrons sont bloqués et la bande de conduction où les électrons sont libres. Ces états facilitent le passage des électrons de valence vers la bande de conduction lorsque leur énergie thermique est suffisante. Ce processus de génération thermique engendre l'apparition d'un courant parasite appelé courant d'obscurité. Il correspond au courant mesuré en l'absence de lumière et vient s'ajouter au signal utile. Le signal utile est le courant

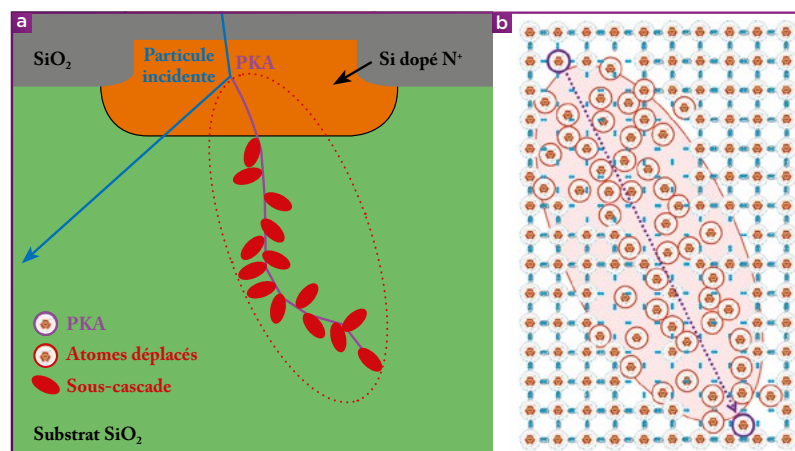


Figure 1

(a) Physiologie de la cascade ramifiée de déplacements atomiques produite par un premier atome déplacé de forte énergie (PKA, pour Primary Knocked-on Atom). (b) Détail de la sous-cascade élémentaire correspondant aux déplacements induits dans le réseau cristallin du silicium par un second atome déplacé de faible énergie.

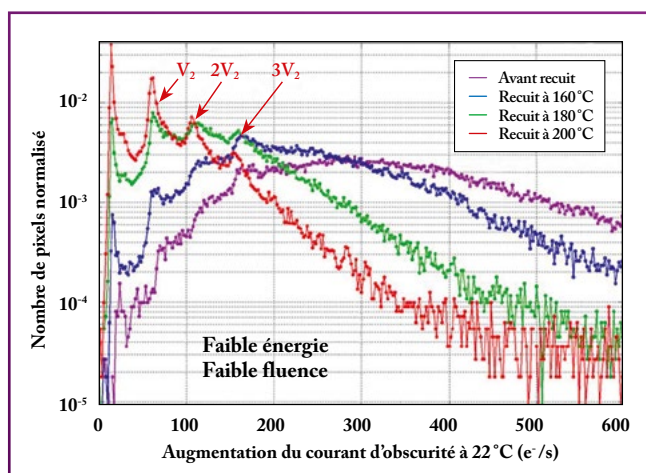


Figure 2

➤ Histogramme du courant d'obscurité dans un capteur d'images irradié par une particule de faible énergie (proton de 110 keV) et à faible fluence ($3,2 \times 10^{10}$ p/cm²). Des pics correspondant à des défauts ponctuels particuliers apparaissent, telle la bi-lacune du silicium V₂, et sont de plus en plus visibles lorsque la température de recuit augmente et fait disparaître les défauts les moins stables.

d'électrons libres généré par l'absorption de la lumière; les électrons excités par les photons sont dans ce cas directement émis vers la bande de conduction. Les particules très énergétiques sont capables de créer simultanément de nombreux défauts complexes dans le pixel frappé, ce qui conduit à une augmentation très importante du courant d'obscurité du pixel touché et donc à une forte diminution de sa sensibilité et de sa dynamique.

D'autre part, les capteurs d'images CMOS sont idéaux d'un point de vue statistique pour caractériser les défauts formés: chaque pixel correspond en effet à un microvolume de silicium dans lequel le courant parasite peut être mesuré indépendamment. Ainsi, avec les milliers ou millions de pixels disponibles, il est possible de tracer un histogramme des augmentations du courant d'obscurité après irradiation: à faible fluence, cet histogramme contient des pics qui traduisent la présence de défauts bien particuliers dans de nombreux pixels (figure 2). Un recuit à température croissante permet d'accélérer la disparition des défauts les moins stables, et fait ainsi apparaître des pics correspondant à des défauts ponctuels particuliers (ici la bi-lacune de silicium, V₂), représentant une dégradation permanente.

Cette technique de caractérisation, appelée spectroscopie du courant d'obscurité, a permis d'identifier plusieurs types de défauts ponctuels induits par des particules, tels que la bi-lacune ou le complexe lacune-phosphore 1.

Pour une particule très énergétique des environnements spatial et nucléaire, les dégâts induits sont tellement importants

que de nombreux défauts sont créés simultanément. La spectroscopie atteint alors ses limites et, faute d'identifier les défauts, il est possible de développer un modèle empirique de prédiction de l'histogramme du courant d'obscurité 2. Pour un capteur d'images donné et pour un environnement dont la composition en particules (type, flux et énergie) est connue, ce modèle permet d'estimer la distribution de l'augmentation du courant parasite du capteur d'images irradié,

et donc de déduire l'impact des radiations sur les performances du capteur (figure 3). En effet, en plus de calculer l'augmentation moyenne du courant parasite dans le capteur d'images, ce modèle permet d'estimer la non-uniformité de cette augmentation entre les différents pixels, qui peut avoir un impact très négatif sur les performances.

CONCLUSION

Ces travaux ont permis d'avancer dans la compréhension scientifique des défauts responsables de l'augmentation du courant d'obscurité dans les capteurs d'images d'avenir en environnement radiatif, et de développer un modèle empirique de prédiction de cette augmentation dans le cas d'environnements avec des particules très énergétiques tels des protons spatiaux ou des neutrons de fusion. Grâce à l'identification de certains défauts ponctuels, ces résultats ouvrent la voie à la compréhension des défauts plus complexes générés par les particules plus énergétiques, et donc au développement de modèles de prédiction plus précis, voire de techniques permettant d'éviter la formation de ces défauts dans les futurs capteurs d'images CMOS.

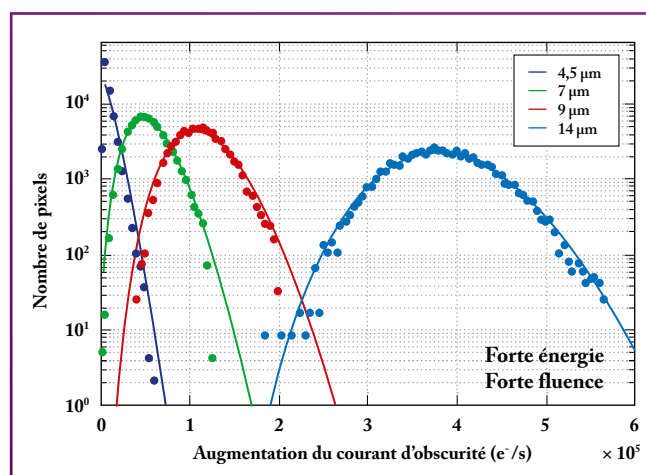


Figure 3

➤ Comparaison de l'augmentation du courant d'obscurité prédite (traits pleins) dans des pixels de différentes tailles (4,5, 7, 9 et 14 µm), aux résultats expérimentaux (symboles) pour une irradiation aux neutrons à forte fluence. La non-uniformité des réponses est parfaitement reproduite.

RÉFÉRENCES

1 J.-M. BELLOIR, V. GOIFFON, C. VIRMONTOIS, P. PAILLET, M. RAINE *et al.*, "Dark Current Spectroscopy in Neutron, Proton and Ion Irradiated CMOS Image Sensors: From Point Defects to Clusters", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **64**, p.27-37 (2017).

2 J.-M. BELLOIR, *Spectroscopie du courant d'obscurité induit par les effets de déplacement atomique des radiations spatiales et nucléaires dans les capteurs d'images CMOS à photodiode pincée*, Thèse de doctorat de l'université Paul-Sabatier Toulouse III, soutenue le 18 novembre 2016.