

# Simulation d'électrons de très basse énergie pour la microélectronique

■ M. RAINE, P. PAILLET, M. GAILLARDIN / CEA – DAM Île-de-France

L'étude de la sensibilité radiative de technologies électroniques intégrées nécessite une simulation toujours plus détaillée des dépôts d'énergie ionisante. Les codes de transport actuels étant inadaptés, nous avons développé de nouveaux modèles permettant de suivre pas à pas des électrons de quelques eV dans le silicium, afin d'atteindre une précision nanométrique sur la forme des dépôts d'énergie, à l'échelle des composants électroniques actuels.

La simulation de systèmes électroniques sous irradiation est un enjeu critique dans de nombreux domaines, tels que les missions spatiales, l'instrumentation des centrales nucléaires ou certains équipements médicaux. Avec la diminution constante de leur taille, l'évaluation précise de la sensibilité de composants requiert une description de plus en plus détaillée des profils de dépôts d'énergie induits par des particules chargées incidentes. Le code Monte Carlo de simulation des interactions particule-matière Geant4 est un outil adéquat pour traiter cette question, avec toutefois des limites pour les électrons d'énergie inférieure à quelques centaines d'eV. En effet, les modèles standards d'ionisation ne permettent pas de les générer ni de suivre leur trajectoire à ces énergies, pourtant nécessaires à la simulation dans des volumes nanométriques. Nous avons donc développé de nouveaux modèles de génération et de transport d'électrons dans le silicium (matériau principal de la microélectronique), implémentés dans Geant4 sous le nom de « MicroElec ».

## Description de la théorie

MicroElec permet de simuler deux processus physiques :

- ▶ l'ionisation, i.e. l'éjection d'un électron d'un atome cible par une particule chargée incidente;
- ▶ la diffusion élastique des électrons.

Nos développements se sont concentrés sur le

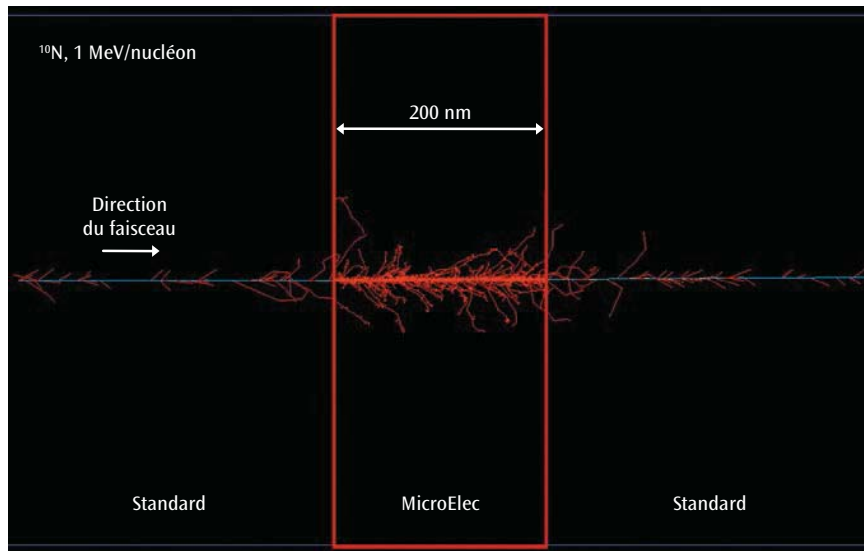
premier processus. La diffusion élastique est traitée par l'utilisation de sections efficaces tabulées par l'ICRU (*International Commission on Radiation Units*).

Les données implémentées dans Geant4 sont des sections efficaces et sections efficaces différentielles inélastiques, calculées à l'aide de la théorie de la fonction diélectrique complexe  $\epsilon(\omega, \vec{q})$ .  $\hbar\omega$  et  $\vec{q}$  sont respectivement l'énergie et le moment transférés de la particule incidente à un électron du matériau cible,  $\hbar$  étant la constante de Planck réduite et  $\omega$  la fréquence plasma. Tous les calculs sont basés sur la modélisation de la fonction de perte d'énergie ou *Energy-Loss Function* (ELF) :

$$ELF(\hbar\omega, \vec{q}) = \text{Im} \left[ \frac{-1}{\epsilon(\omega, \vec{q})} \right]$$

avec  $\text{Im}[\ ]$  la partie imaginaire d'une variable complexe. L'ELF est approchée par une somme de fonctions [1], dont chaque élément correspond à une énergie d'ionisation du silicium. Les sections efficaces différentielles sont calculées pour chaque couche atomique (chaque élément de la somme) par intégration de l'ELF sur  $\vec{q}$ . Une seconde intégration sur  $\hbar\omega$  permet d'obtenir les sections efficaces en fonction de l'énergie de la particule incidente.

Les modèles MicroElec ont ainsi été développés et validés pour des électrons incidents de 16,7 eV à 100 MeV [1,3], et pour des protons et ions lourds incidents de 50 keV/nucléon à 10 GeV/nucléon [2,3].



**Figure 1.** Exemple d'utilisation combinée des processus détaillés MicroElec (activés uniquement dans la tranche centrale) et des processus Geant4 Standard. En bleu, la trace projetée de l'ion incident, en rouge les électrons secondaires.

### Utilisation pratique des modèles

Les calculs MicroElec requièrent une puissance de calcul importante et ne sont pour l'instant implémentés que pour le silicium. À l'inverse, les processus Geant4 Standard sont nettement moins gourmands en puissance de calcul, moins détaillés, mais couvrent de nombreux matériaux. De plus, l'impact réel de calculs détaillés se fait surtout sentir dans de petits volumes cibles, tels que le volume sensible d'un transistor, généralement inclus dans une géométrie complexe plus large, impliquant différents matériaux. Il peut ainsi s'avérer pertinent de combiner les processus Standard et MicroElec dans la même simulation, comme illustré sur la **figure 1**. Dans cet exemple, MicroElec n'est utilisé que dans une tranche de silicium de 200 nm, au centre de la géométrie, tandis que les processus Standard sont utilisés partout ailleurs. La trajectoire d'un ion incident  $^{10}\text{N}$  de 1 MeV/nucléon apparaît en bleu; les électrons secondaires générés sont en rouge. Ils sont clairement plus nombreux dans la tranche MicroElec centrale, où tous les électrons sont explicitement générés, que dans le reste de la géométrie où seuls les électrons d'énergie supérieure à 1 keV sont produits.

### Conclusion

Des modèles détaillés de transport et de génération d'électrons de très basse énergie dans le silicium ont été développés et implémentés dans le code Geant4, utilisables en combinaison avec

des modèles classiques. Ces nouveaux modèles permettent une étude détaillée du comportement de composants électroniques nanométriques sous irradiation, comme illustré dans la référence [4]. Les futurs travaux s'attacheront à élargir la base de données des matériaux couverts par ces modèles.

### Références

- [1] A. VALENTIN, M. RAINE, J.-E. SAUVESTRE, M. GAILLARDIN AND P. PAILLET, "Geant4 physics processes for microdosimetry simulation: very low energy electromagnetic models for electrons in silicon", *Nucl. Instr. Meth. B*, **88**, p. 66-73 (2012).
- [2] A. VALENTIN, M. RAINE, M. GAILLARDIN AND P. PAILLET, "Geant4 physics processes for microdosimetry simulation: very low energy electromagnetic models for protons and heavy ions in silicon", *Nucl. Instr. Meth. B*, **287**, p. 124-129 (2012).
- [3] M. RAINE, M. GAILLARDIN AND P. PAILLET, "Geant4 Physics Processes for Silicon Microdosimetry Simulation: Improvements and extension of the energy-range validity up to 10 GeV/nucleon", *Nucl. Instr. Meth. B*, **325**, p. 97-100 (2014).
- [4] M. RAINE, A. VALENTIN, M. GAILLARDIN AND P. PAILLET, "Improved simulation of ion track structures using new Geant4 models - Impact on the modeling of advanced technologies response", *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **59**, p. 2697-2703 (2012).