

IR vision: from chip to image/Vision IR : du composant à l'image

Caractérisation et modélisation de composants matriciels infrarouge

Pierre Castelein

Commissariat à l'énergie atomique (CEA), laboratoire d'électronique et des technologies de l'information (LETI),
département optronique /laboratoire infrarouge (SLIR), 17, rue des Martyrs, 38054 Grenoble cedex 9, France

Présenté par Guy Laval

Résumé

Ce papier a pour objet de décrire les premiers modèles comportementaux de composants refroidis (à base de HgCdTe) qui ont été réalisés au CEA-LETI/SLIR afin de mettre en valeur l'intérêt que présente une telle démarche pour l'évaluation des systèmes optroniques et de leurs améliorations potentielles. Le papier présente tout d'abord la démarche de modélisation (choix des blocs fonctionnels et paramètres modélisés en fonction du besoin, outils et méthodes de modélisation, calibration, ...). Ensuite les modèles sont comparés aux résultats de caractérisations électro-optiques menées sur des composants ayant servis à la validation de l'approche. *Pour citer cet article : P. Castelein, C. R. Physique 4 (2003).*

© 2003 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Characterization and modelling of IR sensors. The objective of this paper is to describe the first behavioural models of cooled (based on HgCdTe photodetectors) infrared sensors which were designed at CEA-LETI/SLIR. In this way, the interest of such an approach in the evaluation and improvement of optronic systems will be shown. The paper first presents the modelling approach (architecture of the models, choice of parameters, tools for modelling and calibration, ...). Then models are compared to measurements on real components in order to verify the efficiency of the modelling approach. *To cite this article: P. Castelein, C. R. Physique 4 (2003).*

© 2003 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Détecteurs infrarouge ; HgCdTe ; Plan focal ; Modèle comportemental ; Modèle SPICE EKV2.6LT

Keywords: Infrared detectors; HgCdTe; Focal plane array; Behavioural modelling; SPICE EKV2.6LT model

1. Introduction

L'évaluation de systèmes optroniques IR (InfraRouge) peut s'avérer longue et coûteuse selon les applications et la complexité du (des) capteur(s) matriciel infrarouge employé(s). En effet pour être représentative elle requiert généralement la conception et la fabrication de prototypes puis leur caractérisation en conditions réelles de fonctionnement. Une nouvelle approche de plus en plus utilisée peut alors consister à s'affranchir de la réalisation complète du système en ayant plutôt recours à la modélisation comportementale de ses constituants : génération de scène IR, transmission atmosphérique, optique, capteur infrarouge, électronique d'acquisition et de traitement du signal, ...

Le CEA-LETI/SLIR a pour mission de concevoir les nouvelles générations de détecteurs infrarouge refroidis (HgCdTe) et non refroidis (μ -bolomètres en a-Si) [1]. À ce titre il dispose de l'expertise dans l'analyse du comportement de ces détecteurs et possède les données et outils de caractérisation nécessaires à leur modélisation. Ses bases de données technologiques, ses

Adresse e-mail : pierre.castelein@cea.fr (P. Castelein).

Tableau 1

Les trois niveaux hiérarchiques de modèles de senseurs infrarouge

Table 1

The three hierarchical levels of modelling for IR sensors

Type	Complexité	Caractéristique (-/+)	Applications
Détecteur simple	Paramètres technologiques	– non linéarité du CL	Évaluation grossières des performances
Matrice de détection	Bases de données technologiques	– dispersions du CL	Impact des paramètres technologiques sur le système (BSFR) Perspectives
	Paramètres technologiques	+ représentativité du modèle	
IRCMOS « complet »	Bases de données techno	– dispersions du CL	Validation de Nouvelles architectures d'IRCMOS: – Performances E.O. – BSFR Perspectives
	Modèle simplifié du circuit de lecture		
	Modèle « matrice détection »	++ représentativité du modèle	
	Simulations électriques du CL	+ évolutivité de l'architecture CL – évolutivité TPF	

moyens de caractérisation électro-optiques ainsi que ses outils de simulations électriques lui permettent de développer puis calibrer des modèles de senseurs infrarouges de manière à les rendre représentatifs du comportement réel du capteur. A ce titre il a déjà participé à la réalisation de plusieurs modèles de senseurs infrarouge refroidis et non refroidis. Ce compte-rendu décrit tout d'abord la démarche et les moyens employés pour ces modélisations puis présente un exemple de modèle de composant refroidi.

2. Principes de modélisation

2.1. Les différents niveaux de modèle

Selon les besoins du concepteur de système optronique, le modèle associé au senseur infrarouge peut être plus ou moins complexe. Ces niveaux de complexité peuvent être hiérarchisés en trois grandes classes résumées dans le Tableau 1. Le premier niveau que nous appelons « détecteur simple » ne décrit que le comportement électro-optique du détecteur quantique ou thermique (réponse, bruit, courant d'obscurité, ...) en fonction de ses paramètres technologiques et permet d'évaluer rapidement les performances typiques selon les conditions d'opération (température, ...) [2]. Le second niveau de modélisation appelé ici « matrice de détection » inclut en outre les dispersions technologiques associées à chacun des paramètres du « détecteur simple » et peut également comprendre un modèle simplifié du circuit de lecture (fonction de transfert du premier ou deuxième ordre). Ce type de modèle permet de déterminer les limites d'opérabilité du système (NETD minimal, bruit spatial fixe, ...) compte tenu des dispersions associées au senseur. Le dernier niveau dit « IRCMOS complet » inclut également les non linéarités, dispersions et bruits temporels associés aux différentes fonctions du circuit de lecture. Il permet d'évaluer très efficacement les performances de nouvelles architectures de senseurs quand le coût de la validation est très élevé. Ce compte-rendu ne traite que du dernier niveau – le plus représentatif du comportement réel du composant – que nous appelons « IRCMOS complet » et qui a servi de base à la réalisation de nos modèles.

2.2. Architecture générale

Les modèles de composant matriciels IR réalisés au CEA-LETI/SLIR ont pour caractéristique de simuler le signal de sortie délivré par le senseur en fonction du flux photonique reçu par chacun de ses pixels, de son temps d'intégration et de sa température de fonctionnement. Le modèle est donc constitué de sous-ensembles qui correspondent généralement aux différents étages fonctionnels du composant (circuits de détection, étage d'entrée, étage d'intégration, amplificateurs en bout de colonne, sortie vidéo, ...). A chaque sous-ensemble sont associées une variable d'entrée V_{in} [nb lignes, nb colonnes] et une variable de sortie V_{out} [nb lignes, nb colonnes]. Chaque sous-bloc est également décrit par 3 éléments :

- une fonction de transfert moyenne $y = f_{moy}(x)$;
- une fonction écart-type $y = \sigma(x)$;
- une matrice K [nb lignes, nb colonnes] donnant la répartition spatiale des dispersions sur la fonction de transfert moyenne dans $\pm 3\sigma$.

On peut alors écrire la relation liant V_o à V_{in} sous la forme :

$$V_o(i, j) = f_{moy}(V_{in}(i, j)) + K(i, j) * \sigma(V_{in}(i, j)).$$

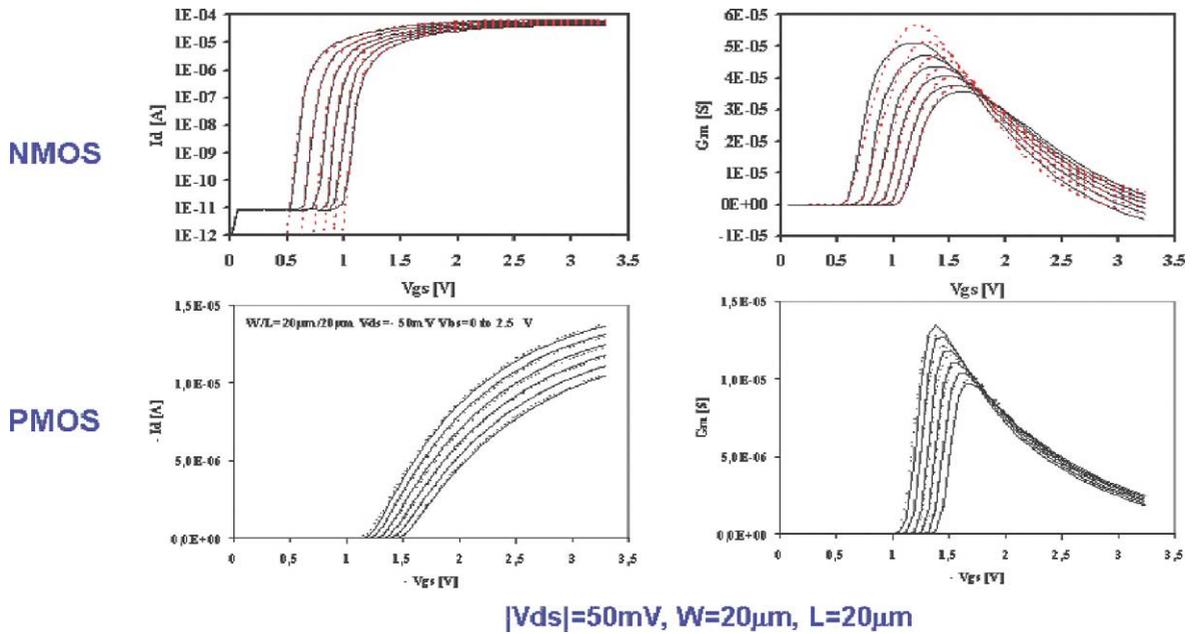


Fig. 1. Courant de drain et transconductance de grille de transistors NMOS et PMOS mesurés et simulés avec le modèle EKV2.6LT à 77 K en régime ohmique en technologie 0,35 μm .

Fig. 1. Simulated and measured drain current and gate transconductance of NMOS and PMOS transistors measured and simulated at 77 K with the EKV2.6LT model in ohmic mode for a 0.35 μm technology.

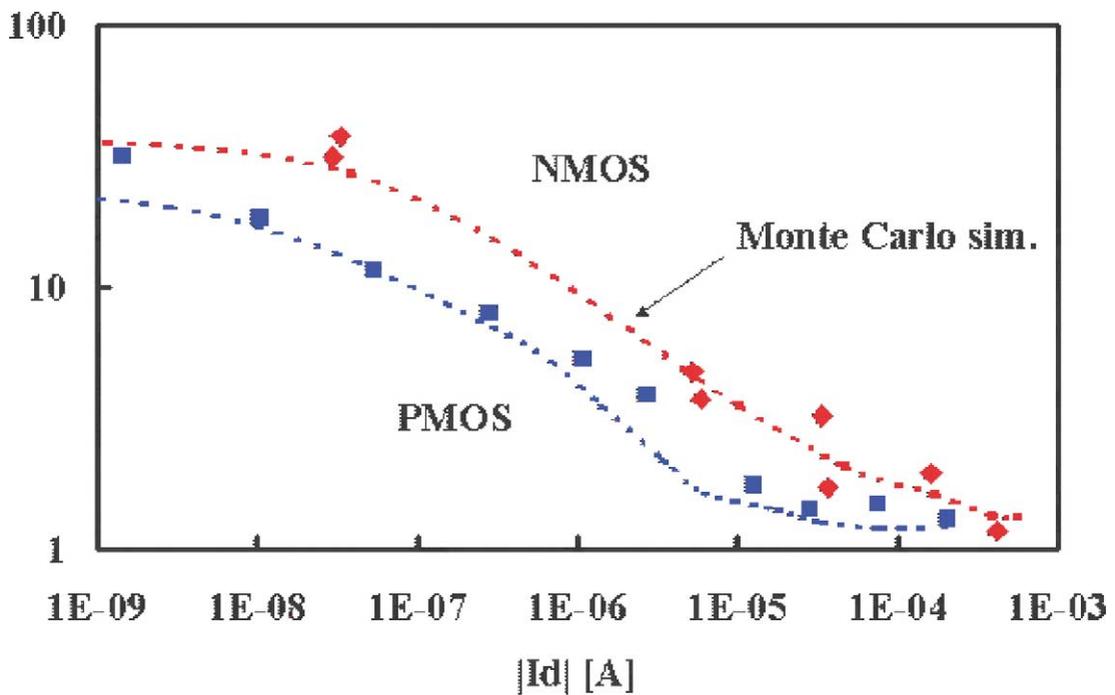


Fig. 2. Dispersions de courant de drain simulées avec le modèle EKV2.6LT et mesurées à 77 K en technologie 0,35 μm .

Fig. 2. Measured and simulated drain current mismatch in saturation from weak to strong inversion.

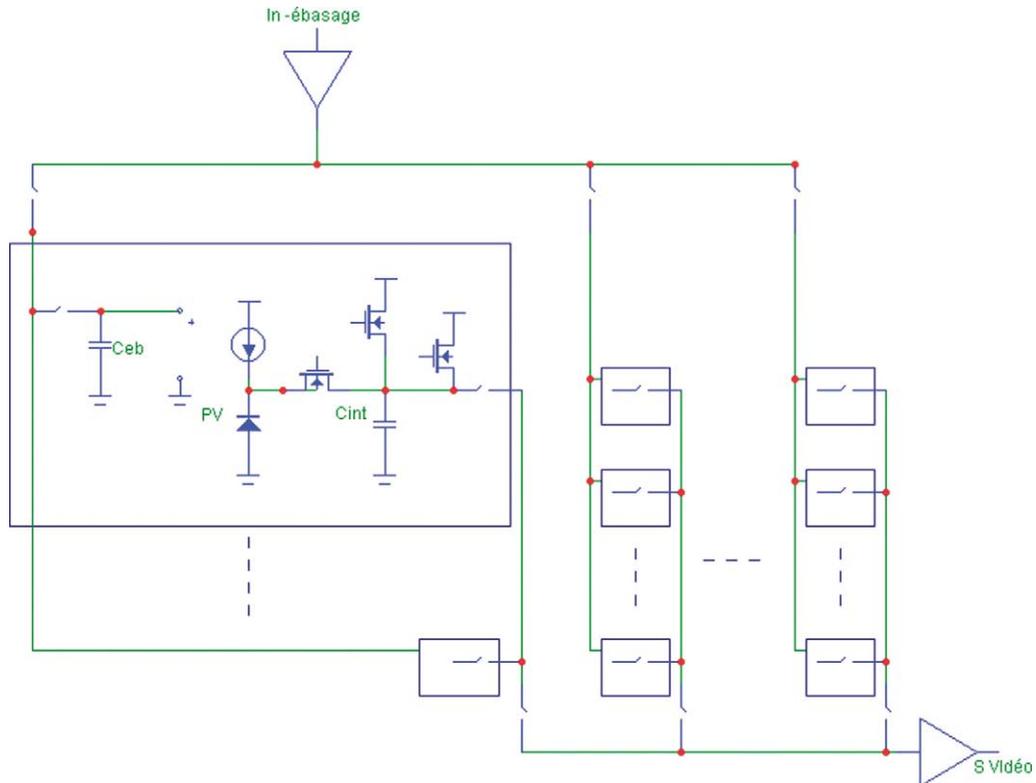


Fig. 3. Architecture simplifiée de l'IRCMOS refroidi.

Fig. 3. Simplified architecture of the cooled IRFPA.

Cette équation générale ne prend pas en compte le bruit temporel associé à chaque sous-ensemble. C'est pourquoi deux paramètres additionnels sont nécessaires :

- v_b donnant le bruit RMS ramené en sortie ;
- $Kb[nb\ lignes, nb\ colonnes]$ une matrice de nombres aléatoires tirés dans une distribution normale centrée réduite.

On a finalement :

$$Vo(i, j) = f_{moy}(Vin(i, j)) + K(i, j) \times \sigma(Vin(i, j)) + Kb(i, j) \times v_b.$$

On voit donc que l'observabilité des fonctions et paramètres de chaque sous-ensemble est une condition nécessaire à la représentativité du modèle. Elle conditionne également le niveau de découpage en sous-éléments du modèle.

2.3. Les outils

La modélisation implique tout d'abord l'utilisation de logiciels de traitements mathématiques adaptés au calcul matriciel et qui autorisent la description de l'architecture du modèle sous la forme de fonctions paramétrables. Son calibrage fait alors appel aux bases de données technologiques du laboratoire pour la matrice de détection (rendement quantique, longueur d'onde de coupure, dispersions, ...). Les paramètres du circuit de lecture (non-linéarités dispersions, bruits, ...) sont directement extraits des simulations électriques servant à la conception du circuit. Ceci est possible parce que le LETI dispose d'outils d'extractions de paramètres électriques des transistors à haute et basse température. En effet, nous concevons des circuits de lecture CMOS analogiques haute performance pour des composants IR de grande complexité (senseurs méga pixels au pas de $15\ \mu\text{m}$ [3], senseurs bispectraux [4], très longues barrettes [5], ...). Ces circuits opèrent généralement à basse température (de 77 K à 200 K) avec une très faible consommation de puissance. Leur conception requiert donc des modèles de simulation électrique type SPICE à la fois adaptés aux régimes de faible et moyenne inversion des transistors MOS et valides à basse température. C'est pourquoi le LETI a adapté le modèle EKV2.6 en collaboration avec l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).

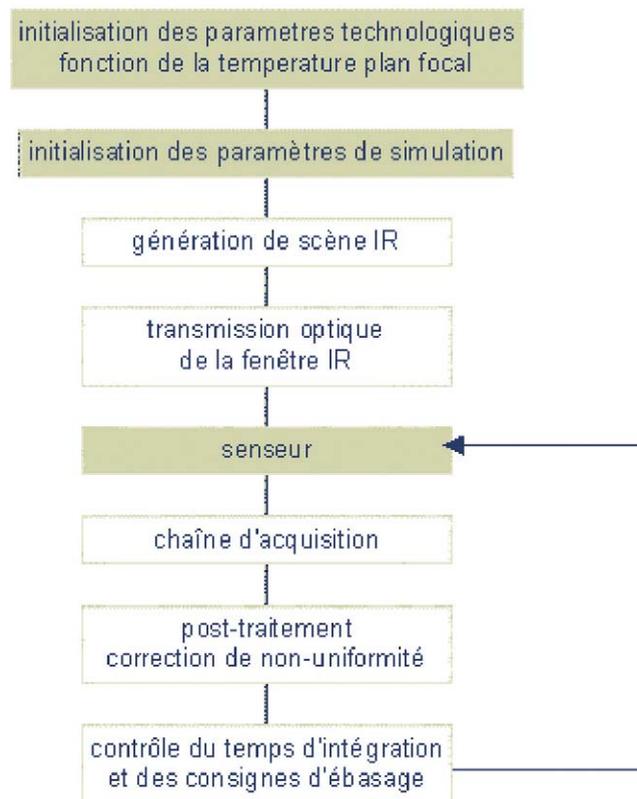


Fig. 4. Synoptique du système optronique modélisé.

Fig. 4. Synopsis of the modelled optoelectronic system.

Ainsi les modèles de fluctuation de mobilité et de dégradation de la transconductance en faible inversion ont été améliorés dans le cas des basses températures [6]. Ce modèle est intégré dans les simulateurs ELDO et UTMOST sous le nom EKV2.6LT. A ce modèle sont également associés des paramètres électriques de type DC, AC, dispersions et bruit extraits sur motifs de test élémentaires de différentes géométries. Cette démarche a été appliquée aux technologies silicium ATMEL 0.7, 0.5, 0.35 et 0.21 μm [7,8]. A titre d'illustration les Figs. 1 et 2 présentent les caractéristiques électriques de transistors NMOS et PMOS simulées et mesurées à 77 K pour une technologie 0.35 μm . Le modèle EKV2.6LT reproduit très fidèlement les caractéristiques réelles des transistors et se révèle être un excellent outil pour la simulation analogique à basse température.

3. Un modèle de composant matriciel refroidi

La démarche présentée dans le Section 2 a été appliquée à la modélisation d'un système optronique incluant un composant IR matriciel refroidi à base de détecteurs photovoltaïques en HgCdTe et conçu au CEA-LETI. Ce composant opère dans la bande spectrale 3–5 μm et présente un format de 128 \times 128 pixels au pas de 50 μm . Il fonctionne pour des températures plan focal de 77 K et 200 K. Enfin, il intègre un système de suppression de courant de fond ajustable indépendamment pour chaque pixel à la cadence trame [6]. Son schéma de principe simplifié est donné sur la Fig. 3. Il a été réalisé en technologie CMOS ATMEL 0,7 μm . La Fig. 4 présente le synoptique général du système optronique modélisé.

Les entrées associées au modèle du composant sont :

- la luminance spectrique en fonction de la longueur d'onde reçue par chaque pixel ;
- le temps d'intégration ;
- la tension de consigne d'ébasage pour chaque pixel ;
- la température du plan focal.

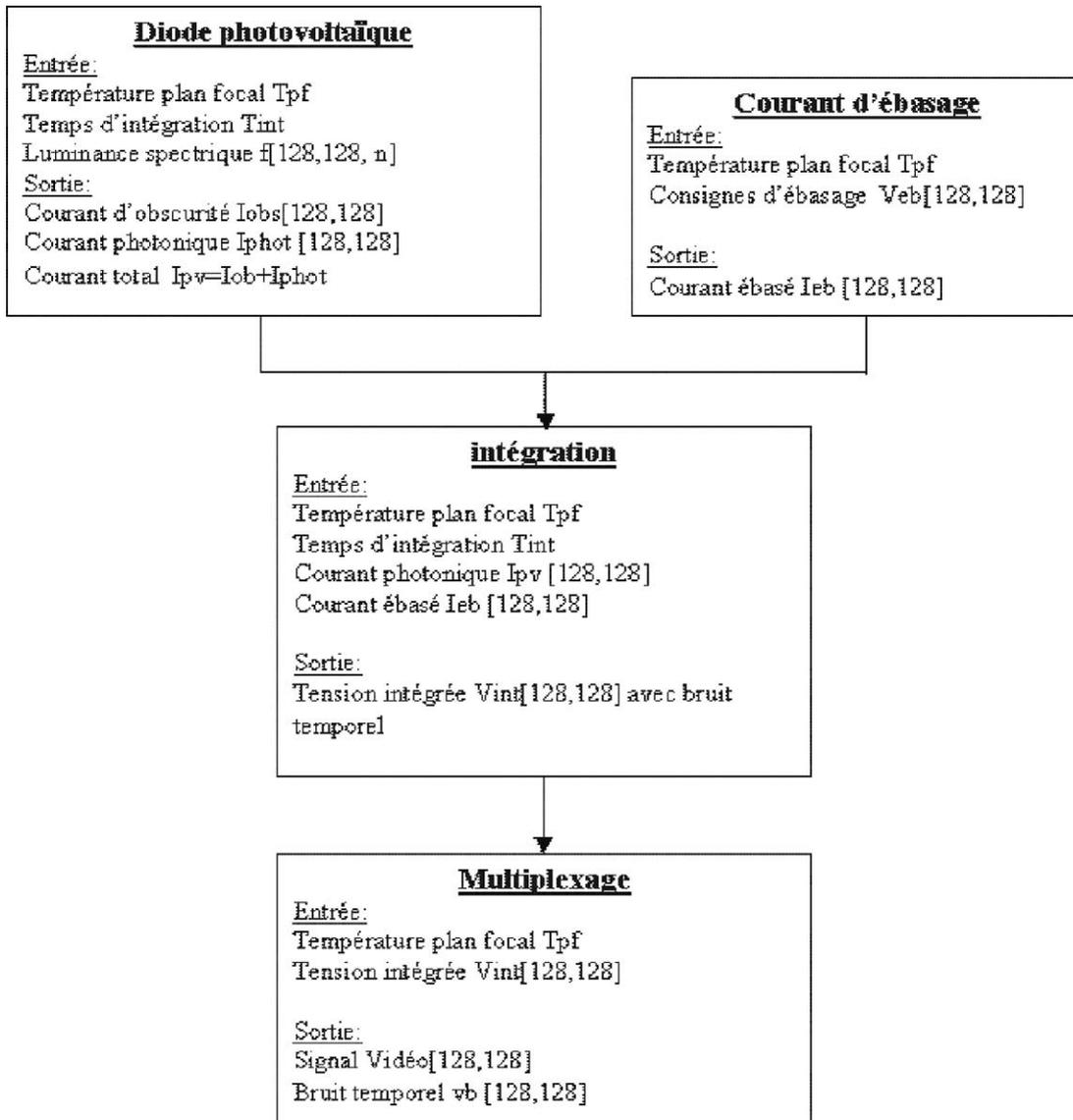


Fig. 5. Architecture générale du modèle de l'IRCMOS.

Fig. 5. General architecture of the modelled IRFPA.

Les sorties du modèle sont :

- la tension de sortie pour chaque pixel correspondant au courant photonique intégré ;
- le bruit temporel pour chaque pixel (bruit d'origine photonique et bruit électronique du capteur).

Le modèle a été implémenté avec le logiciel mathématique MATLAB. La Fig. 5 présente ses différents sous-ensembles avec leurs variables d'entrée-sortie et les paramètres associés. Pour la partie circuit de détection, les paramètres de dispersions de rendements quantiques et de courants d'obscurité sont issus des bases de données technologiques du CEA-LETI/SLIR. Les fonctions de dispersions associées aux fonctions de transferts des sous-ensembles ébasage, intégration et lecture ont été obtenues au moyen de simulations électriques de type Monte Carlo.

La comparaison entre les résultats de caractérisations électro-optiques sur un composant réel et les données issues du modèle ont permis de vérifier la pertinence de ce dernier. Ces résultats sont présentés sur les Figs. 6 et 7 donnant la réponse au corps

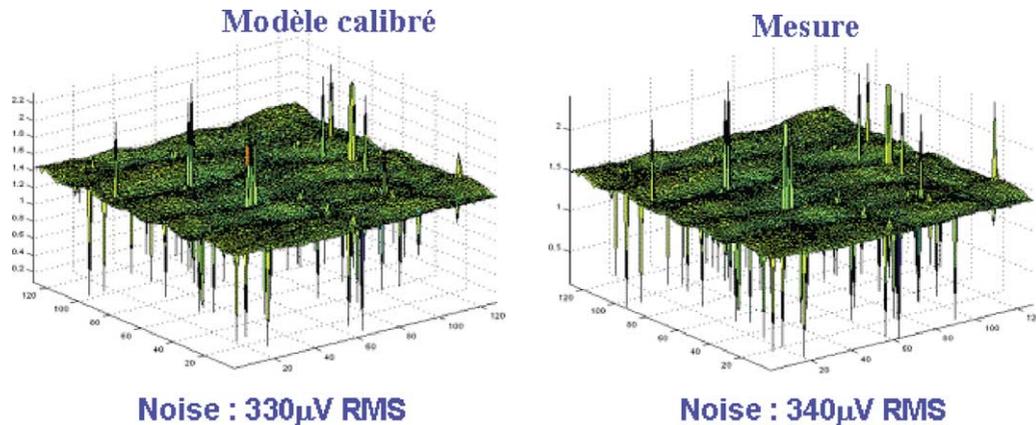


Fig. 6. Réponse au corps noir (20 °C) simulée et mesurée à 77 K (système d'ébasage dans le pixel désactivé).

Fig. 6. Comparison between the simulated and measured blackbody response at 77 K (current suppression system deactivated).

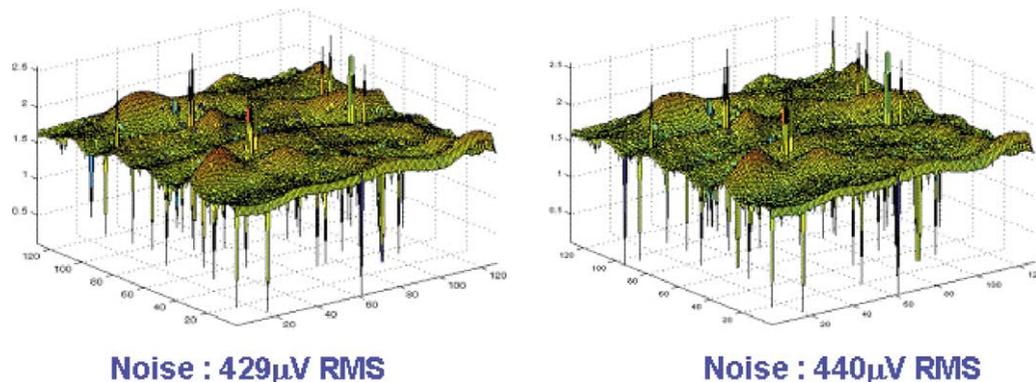


Fig. 7. Réponse au corps noir (20 °C) simulée et mesurée à 200 K (système d'ébasage dans le pixel désactivé).

Fig. 7. Comparison between the simulated and measured blackbody response at 200 K (current suppression system deactivated).

noir du composant et de son modèle ainsi que le bruit temporel correspondant pour des températures plan focal de 77 K et 200 K. Les défauts réels de type circuits ouverts ou courts circuits ont également été introduits dans le modèle afin de faciliter la comparaison. Pour les deux températures plan focal on constate une très bonne adéquation entre réalité et modélisation. Les différences sont difficilement décelables hormis l'accentuation de certains défauts et une légère sous-estimation du bruit temporel moyen en simulation pour les deux températures de plan focal simulées.

4. Conclusion

De part sa mission d'expertise en technologies de composants matriciels IR refroidis et non refroidis, le CEA-LETI/SLIR dispose des outils nécessaires à leur conception, caractérisation et simulation. C'est la raison pour laquelle le laboratoire s'est impliqué dans le développement de modèles comportementaux dans le cadre de plusieurs collaborations à des projets ayant trait à l'analyse de systèmes optroniques complexes (fusion d'images de diverses bandes spectrales, qualification de fonctions électroniques complexes dans le circuit de lecture du capteur, prédiction des performances des technologies à moyen terme, ...). Le travail de modélisation a également été mené pour la technologie de composants matriciels non refroidis à base de microbolomètres en a-Si développée au CEA-LETI/SLIR. Les premiers modèles de composants rendent déjà très bien compte du fonctionnement des capteurs pour une température de plan focal donnée. Des études sont menées afin d'améliorer la modélisation en fonction des variations de températures plan focal (aspects circuits de lecture et détecteurs, ...). Ce point est en effet très important pour la simulation de systèmes embarqués en conditions opérationnelles sévères.

Remerciements

Cet article n'aurait pu être écrit sans le support de P. Martin, P. Audebert, E. Mottin et de R. Boch et du CEA-LETI et sans le soutien de la délégation générale à l'armement.

Références

- [1] P. Tribolet, P. Bensussan, G. Destefanis, Sofradir approach for the 2.5 and 3th generation of IR detectors, in: Proc. 5th Military Sensing Symposia, in press.
- [2] V.A. Aleksandrov, et al., Simulation of non scanning IR camera, J. Opt. Soc. (2000) 745–749.
- [3] P. Castelein, et al., A megapixel HgCdTe MWIR focal plane array with a 15 μm pitch, in: Infrared Technology and Applications XXVII, Proc. SPIE, April 21–25, 2003.
- [4] J. Baylet, et al., Recent advances in the development of infrared multispectral 128^2 FPAs, in: Infrared Technology and Applications XXVIII, in: Proc. SPIE, Vol. 4721, 2002.
- [5] P. Castelein, et al., New generation of long linear butted HgCdTe arrays for high resolution infrared imaging, in: Infrared Technology and Applications XXVIII, in: Proc. SPIE, Vol. 4721, 2002.
- [6] P. Castelein, P. Audebert, P. Martin, IRFPA advanced behavioral modeling dedicated to optronic systems evaluation, in: Infrared Technology and Applications XXVII, in: Proc. SPIE, Vol. 4369, 2003, pp. 600–609.
- [7] P. Martin, M. Bucher, C. Enz, MOSFET modeling and parameter extraction for low temperature analog circuit design, in: 5th European Workshop on Low Temperature Electronics (WOLTE-5), June 19–21, 2002.
- [8] P. Martin, M. Bucher, Mosfet modelling for low temperature (77 K–200 K) analog circuit design, in: 10th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, June 26–28, 2003.