

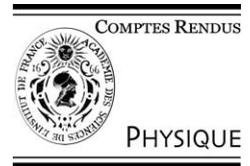


ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Physique 4 (2003) 1083–1088



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

La détection infrarouge avec les plans focaux non refroidis : état de l'art

Jean-Luc Tissot

ULIS, BP21, 38113 Veurey-Voroize, France

Présenté par Guy Laval

Résumé

L'émergence des détecteurs infrarouge non refroidis a ouvert de nouvelles opportunités pour la détection infrarouge tant dans les applications civiles que militaires. Le développement de tels détecteurs doit répondre à des contraintes diverses dont la plus importante est d'utiliser un thermomètre performant et un processus d'intégration utilisant des techniques de la microélectronique silicium. Le CEA/LETI a choisi dès les débuts du développement d'intégrer à l'aide de la technologie silicium un thermomètre résistif sur un circuit CMOS issu d'une filière commercialement disponible. Cette seule approche a un potentiel de coût de fabrication très réduit par rapport aux technologies concurrentes. La technologie a été transférée à la société Sofradir qui a ensuite externalisé cette activité dans sa filiale ULIS. Le CEA/LETI et ULIS travaillent maintenant à l'amélioration des performances de la filière pour permettre la réalisation de composants de faibles dimensions économiquement plus accessibles à de nombreuses applications. Nous présentons dans cet article une revue de l'état de l'art dans le monde ainsi que les nouveaux produits en cours de développement à ULIS. *Pour citer cet article : J.-L. Tissot, C. R. Physique 4 (2003).*

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

Abstract

Uncooled focal plane infrared detectors: the state of the art. The emergence of uncooled detectors has opened new opportunities for IR detection for both military and commercial applications. Development of such devices involves a lot of trade-offs between the different parameters that define the technological stack. These trade-offs explain the number of different architectures that are under worldwide development. The key factor is to find a high sensitivity and low noise thermometer material compatible with silicon technology in order to achieve high thermal isolation in the smallest area as possible. Ferroelectric thermometer based hybrid technology and electrical resistive thermometer based (microbolometer) technology are under development. LETI and ULIS have chosen from the very beginning to develop first a monolithic microbolometer technology fully compatible with commercially available CMOS technology and secondly amorphous silicon based thermometer. This silicon approach has the greatest potential for reducing infrared detector manufacturing cost. After the development of the technology, the transfer to industrial facilities has been performed in a short period of time and the production is now ramping up with ULIS team in new facilities. LETI and ULIS are now working to facilitate the IRFPA integration into equipment in order to address a very large market. Achievement of this goal needs the development of smart sensors with on-chip advanced functions and the decrease of manufacturing cost of IRFPA by decreasing the pixel pitch and simplifying the vacuum package. We present in this paper the technology developed by CEA/LETI and its improvement for being able to designs 384×288 and 160×120 arrays with a pitch of $35 \mu\text{m}$. Thermographic application needs high stability infrared detector with a precise determination of the amount of absorbed infrared flux. Hence, infrared detector with internal temperature stabilized shield has been developed and characterized. These results will be presented. *To cite this article: J.-L. Tissot, C. R. Physique 4 (2003).*

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

Adresse e-mail : jl.tissot@ulis-ir.com (J.-L. Tissot).

Mots-clés : Microbolomètres ; Plans focaux IR non refroidis ; Silicium amorphe ; Oxyde de vanadium

Keywords: Microbolometer; Uncooled IR focal plane array; Amorphous silicon; Vanadium oxide

1. Introduction

Les détecteurs non refroidis à microbolomètres sont en train de prendre une part importante du marché de l'imagerie thermique. De nombreux développements sont en cours et des caméras légères sont déjà disponibles démontrant ainsi les possibilités du non refroidi.

Les efforts de développement du non refroidi sont actuellement dirigés dans deux directions :

- les composants de hautes performances pour les applications militaires ou professionnelles de haut de gamme ;
- les composants de faible coût pour les applications de grandes série.

L'objectif de ces efforts peut se résumer à un axe de travail qui est de diminuer la taille du pixel tout en conservant le même niveau de performance. Nous présentons ci-dessous un rappel des développements en cours à travers le monde en comparant les filières sur le thermomètre employé avant d'aborder les développements réalisés en France par les équipes du CEA/LETI et d'ULIS.

2. État de l'art en développement des technologies

Beaucoup de développements sont en cours en particulier aux États-Unis et en Europe avec des soutiens militaires pour des applications de grande diffusion comme les jumelles thermiques ou les viseurs de fusil des fantassins.

2.1. États-Unis

Les États-Unis sont actifs dans le « non refroidi » depuis le début des années 1980 avec les développements de Honeywell avec la filière « oxyde de vanadium » et Texas Instruments avec les filières « céramique ferroélectrique » et « silicium amorphe ».

La Fig. 1 illustre les importantes ré-organisations industrielles qui ont conduit des acteurs de 1980 aux acteurs d'aujourd'hui. Trois filières existent donc aux États-Unis.

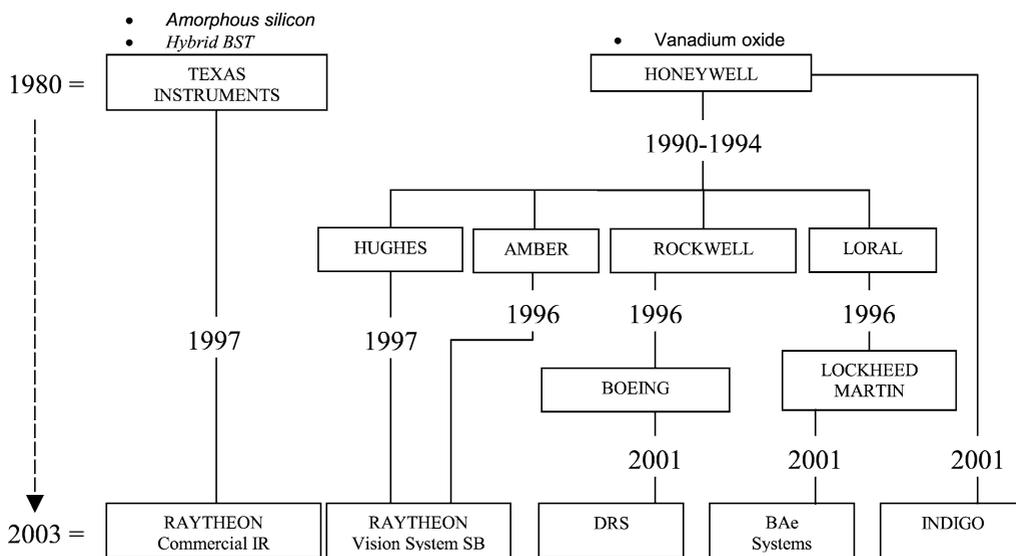


Fig. 1. Configuration industrielle des activités en « non refroidi » aux États-Unis.

2.1.1. Filière « oxyde de vanadium »

Développée par Honeywell et produite aujourd'hui par Raytheon Vision Systems, DRS et BAe, et plus récemment par Indigo. De hautes performances sont démontrées par cette filière et le challenge actuel est d'être capable de réduire la dimension des pixels jusqu'à environ 25 μm . Raytheon [1] et DRS [2] développent des structures complexes à double couches suspendues tandis que BAe, dans un pixel au pas de 28 μm reste fidèle à une structure à simple couche plus traditionnelle [3].

2.1.2. Filière « céramique ferroélectrique »

Développée par Texas Instruments et maintenant par Raytheon Commercial Infrared à Dallas, la structure est composée d'une matrice de détecteurs élémentaires en titanate de strontium et de barium (BST), hybridée par microbilles sur un circuit de lecture. Cette structure hybride limite l'isolation thermique du détecteur et donc les performances potentielles. Par ailleurs le coût de fabrication reste élevé et des efforts sont actuellement en cours pour développer une version monolithique de cette filière, dans laquelle le détecteur est réalisé directement sur la tranche de circuits de lecture CMOS. La difficulté est alors de réussir à reproduire en couche mince les performances du matériau céramique massif [4].

2.1.3. Filière « silicium amorphe »

Développée précédemment par Texas Instruments et maintenant produite par Raytheon Commercial infrared, cette technologie est plus orientée vers le faible coût nécessité par les applications de grand volume que vers la haute performance.

2.2. Europe

En Europe, la Grande Bretagne a démarré très tôt des développements de détecteurs non refroidis basés sur l'utilisation de matériaux pyroélectriques tels que le tantalate de plomb et zirconium (PZT) pour des applications militaires. Des plans focaux de petite dimension (100 \times 100 pixels) ont toutefois été utilisés dans des caméras pour pompiers. La seconde génération de détecteurs, développée maintenant par BAe et QinetiQ est basée sur un tantalate de plomb et strontium (PST) et des matrices de 256 \times 128 sont en production [5].

En Belgique, l'IMEC, utilisant sa solide expérience en technologie silicium, a développé un microbolomètre en Si-Ge polycristallin industrialisé par Xenic's [6] qui ne fabrique que des composants linéaires de faible complexité.

Les activités en France du CEA/LETI et d'ULIS sont décrites dans les Sections 3, 4 et 5.

2.3. Reste du monde

Des développements sont également en cours au Canada et au Japon. L'INO, au Canada, a développé un filière utilisant l'oxyde de vanadium similaire à celles produites aux USA [7]. Au Japon, Mitsubishi développe avec succès une filière originale utilisant des jonctions p/n silicium comme thermomètre. Par ailleurs NEC, qui travaillait depuis cinq ans environ sur une filière oxyde de vanadium, a pris récemment une licence d'Honeywell pour pouvoir industrialiser ses produits sans enfreindre la loi sur la propriété industrielle. Enfin en Corée, Daewoo Electronics a développé une matrice de 256 \times 256 pixels utilisant un film de titane intégré avec une structure en double couche [8], structure également utilisée par Raytheon et DRS pour l'oxyde de vanadium aux États-Unis.

3. La technologie d'ULIS

Le développement de la filière microbolomètre est faite en France avec une structure unique composée du CEA/LETI pour les développements amont et ULIS pour le développement des boîtiers et la production.

Le CEA/LETI a été impliqué dans le développement des microbolomètres en silicium amorphe depuis 1992 avec un soutien de la DGA. Le CEA/LETI a choisi depuis le début du développement, de travailler sur le silicium amorphe avec une technologie compatible avec les filières silicium CMOS qui servent de circuit de lecture et de support des pixels. Structure monolithique et compatibilité silicium sont les deux caractéristiques essentielles pour pouvoir produire à faible coût des plans focaux non refroidis performants.

En plus de sa compatibilité naturelle avec la technologie silicium, le silicium amorphe présente d'autres avantages. Tout d'abord il permet d'intégrer le thermomètre et son absorbeur dans des membranes très fines qui peuvent supporter des vibrations et des chocs importants. Cette robustesse est importante pour les applications civiles et militaires. Enfin, les propriétés électriques du silicium amorphe se prêtent bien à la réalisation de thermomètres performants avec des facteurs de mérite de l'ordre de 2.4 % K^{-1} supérieurs à ceux de l'oxyde de vanadium.

La première génération de plans focaux non refroidis développée par le CEA/LETI a été transférée en 2000. Depuis ce transfert industriel, le CEA/LETI poursuit des développements pour améliorer les performances de façon à pouvoir réduire le pas des composants.

Tableau 1
Caractéristiques principales du composant UL 01 01 1

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
Nb de pixel	320 × 240	Pas	45 μm
Réponse spectrale	7–14 μm	Facteur de remplissage	> 80 %
NETD typique	85 mK	Opérabilité	> 99 %
Sensibilité	5 mV/K	Non-uniformité de réponse	< 5 %
Dynamique de scène	150 °C	Fréquence trame maximale	100 Hz

Tableau 2
Comparaison des filières de première et de deuxième génération

	Pas (μm)	R _{th} 10 ⁶ K/W	τ _{th} (ms)	NETD (mK)	Commentaires
1 ^{ière} génération (a-Si)	45	12	4	85	Processus industriel
2 ^{ième} génération (a-Si)	35	42	10	36	Résultats en laboratoire

Tableau 3
Caractéristiques électro-optiques typique d'un composant 160 × 120

	Réponse	Bruit rms	NETD
Moyenne	16 mV/K	880 μV	56 mK
Déviatoin standard (%)	1,4	10,4	10,5

4. Développements technologiques

4.1. Filière de première génération

Les développements de la filière de première génération sont maintenant limités à des ajustements rendus nécessaires par l'utilisation de moyens industriels plus récents que ceux utilisés pour le développement. Ces nouveaux équipements permettent d'accroître le rendement de fabrication et l'homogénéité des composants. Le Tableau 1 donne les principales caractéristiques de la 320 × 240 pixels au pas de 45 μm en cours de production.

Une version radiométrique a été développée pour répondre au besoin des applications de thermographie. Ce composant intègre un écran interne maintenu à la même température que le plan focal et qui détermine avec précision l'angle de vue du détecteur à $f/1,4$.

4.2. Développement de la filière de seconde génération

Le CEA/LETI et ULIS travaillent pour développer une filière de seconde génération qui se traduira par une augmentation des performances permettant de dessiner des composants avec une dimension de pixel réduite. La caractéristique clé de la technologie ULIS est cette membrane très fine décrite par ailleurs [9] et qui permet d'atteindre des constantes de temps thermique très faibles (de l'ordre de 4 ms pour un pixel de 45 × 45 μm²). Cette faible valeur donne un degré de liberté pour augmenter l'isolation thermique de l'absorbeur et donc les performances, tout en restant compatible avec les cadences vidéo utilisées par les systèmes (30 Hz à 60 Hz).

La deuxième génération exploite cette particularité de la technologie pour réaliser des matrices de 160 × 120 pixels au pas de 35 μm qui montrent un niveau de performances supérieures à celles de la première génération malgré la réduction du pas des pixels. Le Tableau 2 compare les résultats couramment obtenus avec la filière de première génération aux résultats mesurés au LETI sur la filière de deuxième génération. Cette filière de deuxième génération est en cours de transfert à ULIS.

Les performances mesurées sur les premiers prototypes (Tableau 3) confirment ce gain obtenu entre la première et la deuxième génération. On retiendra, en particulier, l'excellente homogénéité des performances due à l'utilisation d'une technologie silicium.

La Fig. 2 montre l'histogramme de NETD mesuré sur ce nouveau détecteur.

5. Développement des boîtiers

Les détecteurs de première génération sont intégrés dans des boîtiers métalliques (cf. Fig. 3) destinés à maintenir le vide

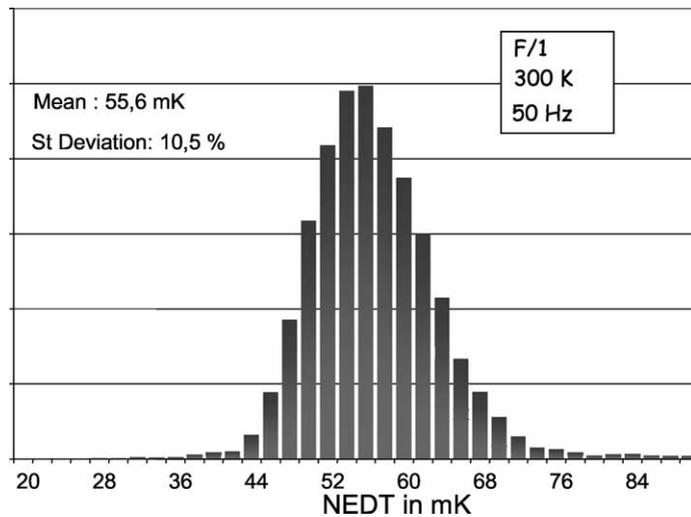


Fig. 2. Histogramme de NETD du composant 160×120 et image infrarouge obtenue avec ce composant.



Fig. 3. Boîtiers métalliques ((a) et (b)) et en céramique (c) développés pour les composants non refroidis.

pendant la durée de vie du composant. Le vide résiduel ne doit pas dépasser quelques 10^{-2} T pour ne pas dégrader les performances des détecteurs par suite des fuites thermiques dans l'atmosphère résiduelle.

De nouveaux boîtiers (cf. Fig. 3) sont en cours de développement en s'appuyant sur des techniques connues par ailleurs. Ces nouveaux boîtiers permettent des opérations d'intégration des plans focaux, réalisées à l'aide d'équipements industriels automatiques pour améliorer la reproductibilité des opérations et la productivité.

En plus des développements de boîtiers menés à ULIS, le CEA/LETI travaille sur une intégration des plans focaux infrarouge directement sur des tranches en silicium [10,11] préparées à cet effet. L'intérêt est, en passant d'une intégration unitaire (puce par puce) à une intégration collective, d'abaisser les coûts de production des composants pour adresser les marchés de très grande diffusion comme le marché automobile.

6. Conclusions

Après une revue des principaux développements dans le domaine des détecteurs infrarouge non refroidis, nous avons présenté l'activité en cours dans les équipes du CEA/LETI et ULIS.

La filière de première génération actuellement industrialisée, permet de fournir des composants au standard 320×240 avec un pixel de $45 \times 45 \mu\text{m}^2$ en versions destinées à l'imagerie ou à la thermographie.

Une amélioration importante en terme de rapport signal à bruit a été démontrée par les équipes du CEA/LETI sur une filière de réalisation de microbolomètres de deuxième génération. Un NETD de 55 mK dans un pixel de $35 \times 35 \mu\text{m}^2$ a été ainsi

obtenus sur les premiers dispositifs prototypes s'approchant ainsi des 30 mK démontrés précédemment en laboratoire sur des structures de test.

L'amélioration de l'intégration des plans focaux en boîtier en particulier en développant des technologies d'intégration collective permettra de fournir des composants à des coûts permettant l'apparition de nouveaux marchés de l'infrarouge de grand volume.

Remerciements

Nous remercions la DGA/DTCO et le Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie qui soutiennent ces études et les équipes du CEA/LETI/LIR et d'ULIS qui y prennent part.

Références

- [1] D. Murphy, M. Ray, R. Wyles, J. Asbrock, N. Lum, J. Wyles, C. Hewitt, A. Kennedy, D. Van Lue, J. Anderson, D. Bradley, R. Chin, T. Kostrzewa, High sensitivity 25 μm microbolometer FPAs, in: *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays VII*, Orlando, FL, USA, in: Proc. SPIE, Vol. 4721, 2002, pp. 99–110.
- [2] P.E. Howard, J.E. Clarke, A.C. Ionescu, C. Li, J.C. Stevens, DRS U6000 640 \times 480 Vox uncooled IR focal plane, in: *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays VII*, Orlando, FL, USA, in: Proc. SPIE, Vol. 4721, 2002, pp. 48–55.
- [3] B.S. Backer, N. Butler, M. Kohin, M. Gurnee, J.T. Whitwam, T. Breen, Recent improvements and developments in uncooled systems at Bae SYSTEMS North America, in: *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays VII*, Orlando, FL, USA, in: Proc. SPIE, Vol. 4721, 2002, pp. 83–90.
- [4] C.M. Hanson, H.R. Beratan, Thin-film ferroelectrics: breakthrough, in: *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays VII*, Orlando, FL, USA, in: Proc. SPIE, Vol. 4721, 2002, pp. 91–98.
- [5] M.A. Todd, P.P. Donohue, R. Watton, D.J. Williams, C.J. Anthony, M.G. Blamire, High performance ferroelectric and magnetoresistive materials for next-generation thermal detector arrays, *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays VII*, Proc. SPIE, Vol. 4721, 2002, in press.
- [6] V.N. Leonov, N.A. Perova, J.P. Vermeiren, B. Grietens, C. Goessens, P. De Moor, C.A. Van Hoof, Optimization of design and technology for uncooled poly-SiGe microbolometer arrays, in: *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays VII*, Orlando, FL, USA, in: Proc. SPIE, Vol. 4721, 2002, pp. 122–133.
- [7] T.D. Pope, H. Jerominek, C. Alain, C. Cayer, B. Tremblay, C. Grenier, P.A. Topart, S. LeClair, F. Picard, C. Larouche, B. Boulager, A. Martel, Y. Desroches, Commercial and custom 160 \times 120, 251 \times 1 and 512 \times 3 pixel bolometric FPAs, in: *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays VII*, Orlando, FL, USA, in: Proc. SPIE, Vol. 4721, 2002, pp. 64–74.
- [8] H.-K. Lee, et al., A high fill-factor IR bolometer using multi-level electrothermal structures, *IEEE Trans. Electron Devices* 46 (7) (1999) 1489–1491.
- [9] C. Vedel, J.L. Martin, J.L. Ouvrier-Buffet, J.-L. Tissot, M. Vilain, J.J. Yon, Amorphous silicon based uncooled microbolometer IRFPA, in: *Infrared Technology and Application XXV*, Orlando, FL, USA, in: Proc. SPIE, Vol. 46, 1999.
- [10] J.J. Yon, L. Biancardini, E. Mottin, J.-L. Tissot, L. Letellier, Infrared microbolometer sensors and their application in automotive safety, in: *Proceeding of AMAA 2003 conference*, in press.
- [11] E. Mottin, J.L. Martin, J.L. Ouvrier-Buffet, M. Vilain, A. Bain, J.J. Yon, J.-L. Tissot, J.P. Chatard, Enhanced amorphous silicon technology for 320 \times 240 microbolometer arrays with a pitch of 35 μm , in: *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays VI*, in: SPIE, Vol. 4369, 2001.