

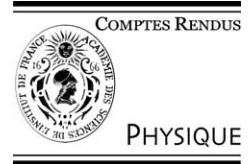


ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Physique 4 (2003) 1109–1120



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

Les nouvelles générations de détecteurs infrarouge à base de HgCdTe

Gérard Destefanis

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

Les technologies de détecteurs infrarouge refroidis très haute performances à base de HgCdTe n'ont cessé de progresser depuis une dizaine d'années et atteignent aujourd'hui une maturité industrielle qui permet la production de formats utilisables ($320 \times 240, 640 \times 480$) à des coûts de plus en plus accessibles. En parallèle on voit poindre des prototypes de senseurs beaucoup plus complexes (matrices megapixels, matrices multispectrales, barrettes hautes définitions, ...) qui montrent les fortes potentialités de cette filière technologique très performante. Cet article présente la filière technologique développée en France et donne l'état de l'art des formats disponibles industriellement puis se focalise sur quelques exemples très récents de prototypes de dispositifs avancés réalisés au LETI dont les performances mesurées sont voisines des valeurs limites prévues par la théorie (matrices bicolores, matrices mégapixels, ...). *Pour citer cet article : G. Destefanis, C. R. Physique 4 (2003).* © 2003 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

New generations of infrared detectors based on HgCdTe. The technology of very high performance cooled infrared detectors made with HgCdTe has progressed continuously for ten years and reached today an industrial maturity that allows the production of large size arrays at a more and more reasonable cost. At the same time, new prototypes of more complex sensors have appeared (megapixel arrays, multicolour arrays, high definition long linear arrays, ...) that show the strong potentialities of this very high performance technology. This paper presents the technology developed in France and gives the state of the art of products available in industry; it then focuses on some very recent realizations of advanced prototypes made at LETI (dualband arrays, megapixel arrays, ...). *To cite this article: G. Destefanis, C. R. Physique 4 (2003).* © 2003 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Détecteurs infrarouge ; HgCdTe ; IRCMOS ; Multispectral ; Imagerie infrarouge haute définition ; Épitaxie par jets moléculaires

Keywords: Infrared detectors; HgCdTe; IRCMOS; High definition infrared imaging; Molecular beam epitaxy

1. Introduction

La majorité des détecteurs infrarouge quantiques de troisième génération développés actuellement ont comme principe de détection la conversion photovoltaïque. Ce mode de détection est identique à celui bien connu des cellules solaires. Les détecteurs élémentaires sont constitués de simples photodiodes (jonctions pn) réalisées dans des semi-conducteurs dont la hauteur de bande interdite est adaptée à l'énergie des photons infrarouge que l'on souhaite détecter.

Adresse e-mail : gerard.destefanis@cea.fr (G. Destefanis).

Parmi les semi-conducteurs les mieux adaptés à ce type de détection, le tellurure de mercure et de cadmium $Hg_{(1-x)}Cd_xTe$ par ces propriétés remarquables a fait l'objet de très importantes investigations dans le monde et en particulier en France. Les détecteurs infrarouge quantiques à base de $Hg_{(1-x)}Cd_xTe$ ont des sensibilités extrêmement grandes (résolution thermique de quelques millièmes de degré K) et atteignent le plus souvent les limites théoriques, mais ceci à la condition d'être refroidis à basse température (typiquement 78 K).

Ces contraintes cryogéniques associées à la complexité des procédés technologiques mis en jeu (croissance des semi-conducteurs, technologie des détecteurs, ...) ont longtemps limité le développement de ces composants de coût relativement élevé à des applications militaires pour lesquelles des sensibilités très grandes étaient requises à tout prix. Actuellement un effort soutenu de la R et D effectué en particulier en France et aux USA a mené les filières technologiques à base de $HgCdTe$ à une maturité industrielle suffisante pour permettre la production massive de composants de grande complexité, à des coûts plus raisonnables, mais toujours destinés à des applications majoritairement militaires et spatiales.

2. La filière de détecteurs $HgCdTe$ développée au LETI

Un développement important a été initié en France depuis 1978 par la Délégation Générale de l'Armement (DGA) et le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) au Laboratoire d'Electronique et des Technologies de l'Information (LETI) du CEA à Grenoble pour la mise au point des technologies de détection infrarouge à base de détecteurs quantiques refroidis.

La filière développée utilise uniquement le semi-conducteur $Hg_{(1-x)}Cd_xTe$. Le choix s'est porté au tout début sur ce matériau qui présente comme spécificité unique d'avoir un gap direct continûment ajustable par la composition x depuis le semiconducteur $CdTe$ (1.6 eV) jusqu'au semimetal $HgTe$ en conservant un paramètre de maille constant (Fig. 1). Ceci permet la réalisation de détecteurs adaptés et optimisés pour chaque domaine spectral que l'on souhaite couvrir à partir de longueurs d'ondes d'environ 1 μm et au delà. On peut ainsi avec une même filière technologique fabriquer des détecteurs opérant dans les bandes 1–3 μm , 3–5 μm , 8–10 μm , 10–14 μm , ...

Cette filière technologique a été transférée à l'industriel Français, Sofradir (Filiale de CEA, Thalès, Sagem) qui en assure la production depuis une quinzaine d'années et est aujourd'hui un des principaux leaders mondiaux pour la production de détecteurs infrarouges IRCMOS de 2-ième génération. Ceci concerne en particulier les barrettes 288 \times 4 et 480 \times 6 pixels en

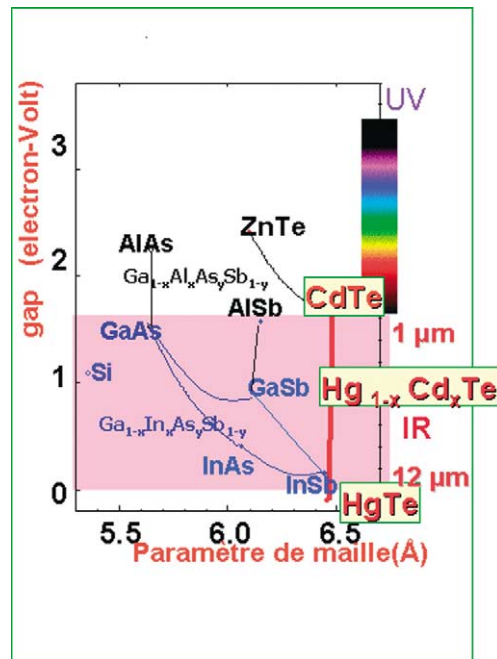


Fig. 1. Variation du gap $HgCdTe$ en fonction de son paramètre de maille.

Fig. 1. $HgCdTe$ bandgap versus lattice parameter.

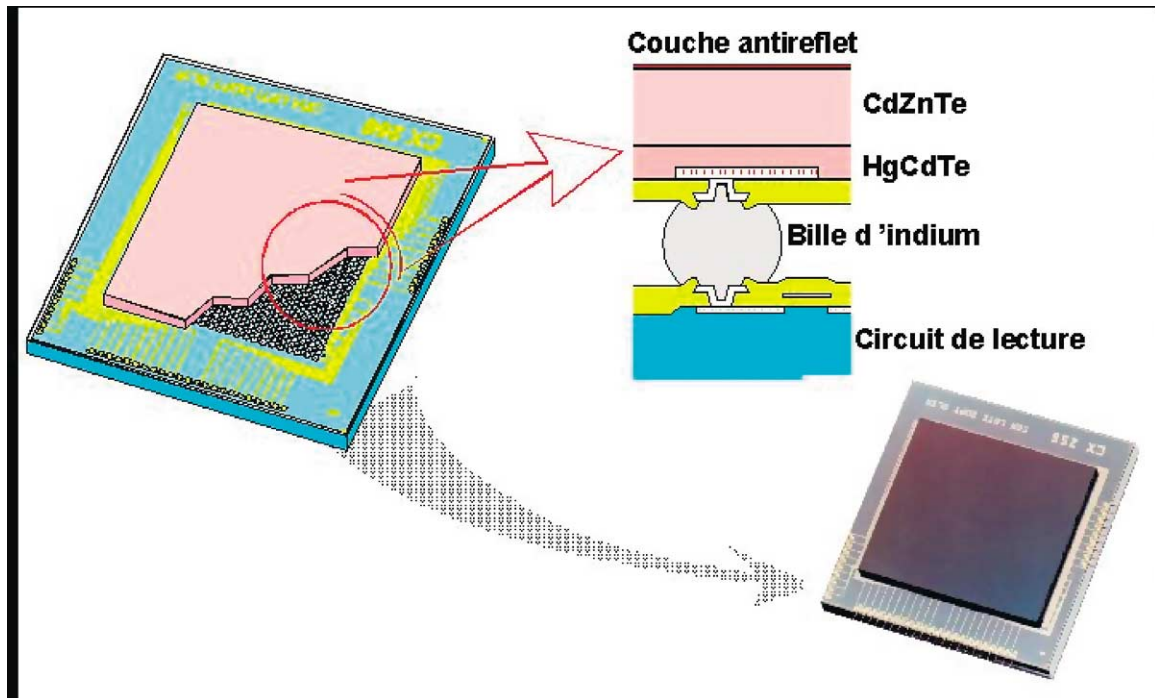


Fig. 2. Architecture des composants matriciels de type IRCMOS à base de HgCdTe.

Fig. 2. HgCdTe IRCMOS architecture.

gamme 3–5 μm et 8–12 μm , les matrices 320 \times 256 pixels aux pas de 30 μm en bandes 1–3 μm , 3–5 μm et 8–12 μm et plus récemment les matrices 640 \times 512 au pas de 20 μm . L'architecture des composants de détection matriciels est hybride, son principe est représenté sur la Fig. 2.

Elle est constituée d'une part de la matrice de détection réalisée dans le semi-conducteur HgCdTe, d'autre part d'un circuit de lecture réalisé en technologie CMOS sur silicium [1]. Ces deux constituants sont interconnectés par des microbilles d'indium. Il y a autant de billes d'indium que de points élémentaires de détection soit de l'ordre de 300 000 pour une matrice de format TV (640 \times 480 pixels).

La partie détection est constituée de jonctions n–p réalisées par technologie planar en implantation ionique dans des couches minces de HgCdTe élaborées par épitaxie sur des substrats orientés de CdZnTe de surface 10–20 cm^2 accordés en paramètre de maille cristallin. Ces substrats sont transparents dans l'infrarouge et permettent donc d'éclairer le dispositif matriciel par la face arrière à travers ce substrat.

Chaque point élémentaire du circuit de détection convertit le flux lumineux en charges électriques qui sont stockées dans un site d'intégration propre à chaque pixel. La conversion charge-tension est ensuite réalisée dans le pixel ou en bout de colonne de manière à sortir un signal de type vidéo. Dans la plupart des applications, la prise d'image est simultanée par l'ensemble des pixels (imagerie « snapshot ») et non pas balayée ligne par ligne comme dans le cas d'un capteur d'imagerie visible.

L'hybridation des matrices de détection sur la tranche silicium de circuits de lecture est faite collectivement, ce qui permet la réduction du coût des composants par test préliminaire sur tranche à basse température des modules IRCMOS fonctionnels.

La technologie d'hybridation par bille d'indium est schématisée sur la Fig. 3 : après leur pré-positionnement optique approximatif, les modules de détection sont posés sur les circuits de lecture sur la tranche silicium. L'ensemble est alors porté à une température de fusion de l'indium puis refroidi à température ambiante. A la température à laquelle est faite l'hybridation, l'indium est liquide, ce qui permet par capillarité d'obtenir un auto positionnement parfait de l'ensemble des modules de détection sur les circuits de lecture en silicium.

Pour cette filière la modélisation des détecteurs à partir des paramètres physiques des structures permet de rendre compte des courants d'obscurité des photodiodes HgCdTe dans un domaine extrêmement étendu de longueur d'ondes de coupure et de température (T : 50–300 K, λ_{co} : 2–14 μm) [2].

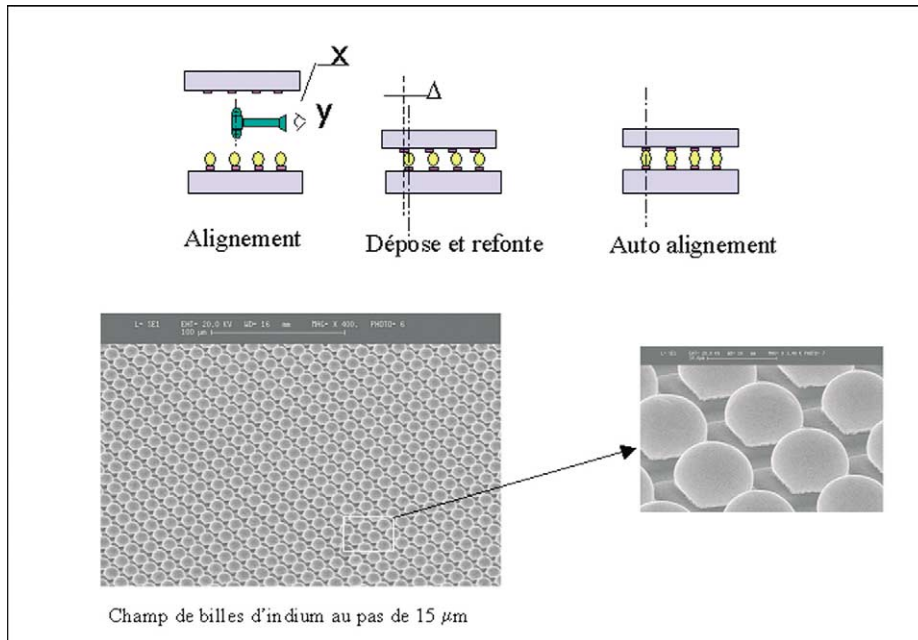


Fig. 3. Technologie d'hybridation par billes d'indium.

Fig. 3. Indium bump technology.

3. Les nouvelles générations de détecteurs à base de HgCdTe développées au LETI

En parallèle au développement industriel de cette filière par la société Sofradir, le LETI poursuit des études avancées dans cette filière que nous allons illustrer par quatre réalisations récentes (démonstration de laboratoire) qui se situent au plus haut niveau de l'état de l'art international.

- Barrettes aboutées très grands nombres de points pour l'observation haute résolution (avion, satellite) ;
- Matrices bispectrales en bande 3–5 μm (EJM de HgCdTe sur CdZnTe ou sur germanium) ;
- Matrices mégapixel monospectrales en bande 3–5 μm ;
- Matrices monospectrales en bande 3–5 μm (EJM de HgCdTe sur germanium).

Ces prototypes avancés font de plus en plus appel à l'épithaxie par jets moléculaires de HgCdTe. Ce nouveau matériau présente une qualité cristalline et des propriétés électriques identiques à celles du matériau de référence qu'est l'épithaxie élaborée en phase liquide, mais avec une uniformité nettement supérieure (pas de fluctuation d'épaisseur). L'épithaxie par jets moléculaires permet de plus la réalisation de multihétérojonctions dopées [3,4].

3.1. Barrettes aboutées très grand nombre de points (bandes 3–5 et 8–12 μm)

Il existe aujourd'hui un besoin pour le développement de systèmes d'imagerie haute résolution en infrarouge pour des applications civiles ou militaires d'observation de la terre depuis des avions ou des satellites [3,5]. Les composants envisagés sont des barrettes linéaires de très grandes dimensions (plus d'un millier de points), l'image étant obtenu par le balayage de la scène par le déplacement de l'avion ou du satellite. Pour obtenir une très haute résolution spatiale à grande distance, en même temps qu'une excellente sensibilité thermique de quelques millièmes de degrés K, des composants présentant un très faible niveau de bruit sont requis. Seuls les détecteurs à base de HgCdTe sont susceptibles de répondre au cahier des charges en particulier dans la bande 8–12 μm .

Le LETI développe depuis une dizaine d'années des recherches qui ont conduit au développement d'une architecture de barrette 1500 2 points au pas de 30 μm réalisée par une technologie originale d'aboutage de sous modules [3,5].

Un composant utilisant cette architecture est présenté en Fig. 4. Il n'est pas envisageable de réaliser un tel composant de 5 cm de long en hybridation directe comme présenté à la Section 2. La technologie développée utilise l'hybridation indirecte de 5 sous modules de détection en HgCdTe de 300 \times 2 points et de 10 sous modules de circuits de lecture CMOS. L'ensemble des

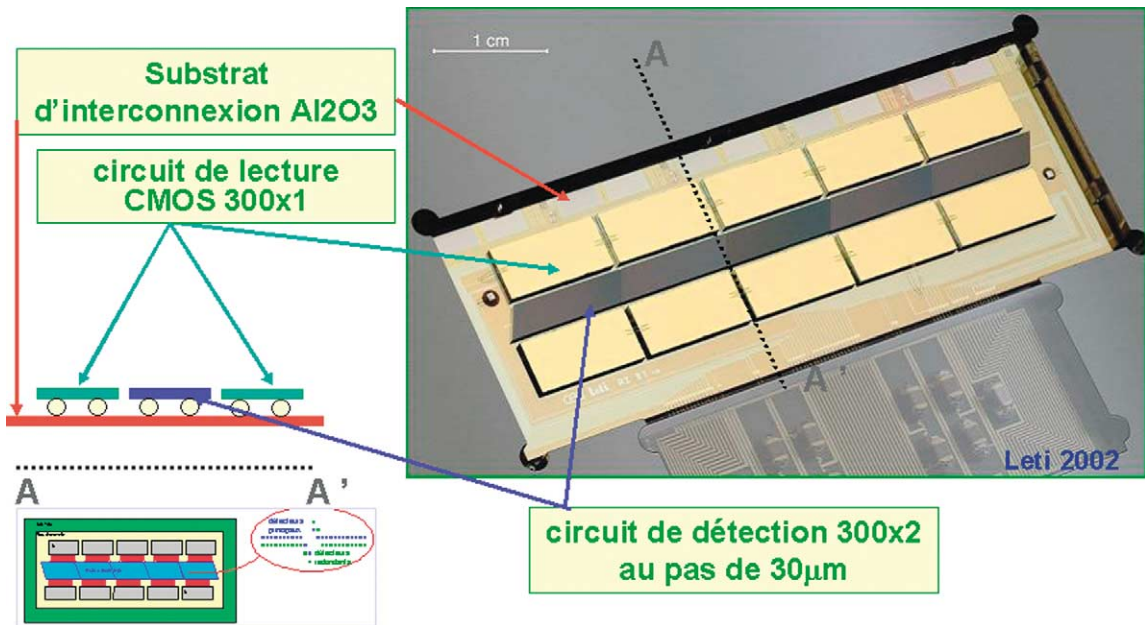


Fig. 4. Composant d'imagerie infrarouge haute résolution 1500×2 opérant en bande 3–5 μm ou 8–12 μm .

Fig. 4. High resolution 1500×2 device operating in 3–5 μm or 8–12 μm band.

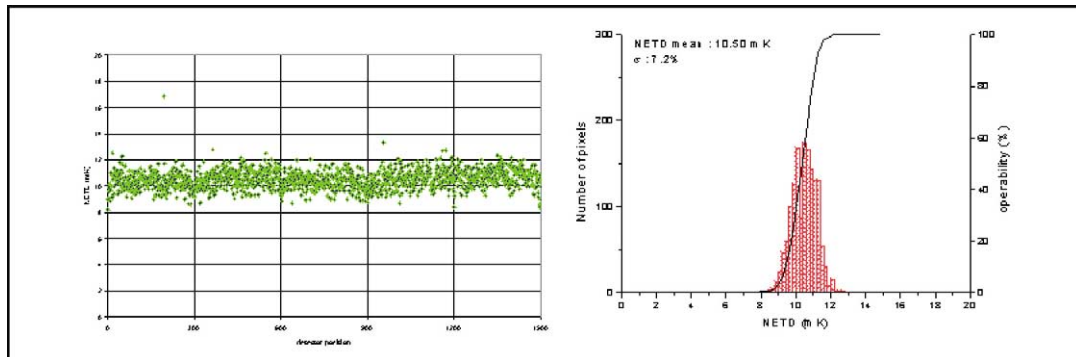


Fig. 5. Histogramme de résolution thermique (composant 1500×2) opérant en bande 3–5 μm (température 77 K, angle de vue 14° , temps d'intégration 2,6 ms, fréquence trame 212 Hz, fréquence de sortie 200 KHz).

Fig. 5. Thermal resolution histograms of component 1500×2 operating in 3–5 μm band (temperature 77 K, field of view 14° , integration time 2.6 ms, imaging frequency 212 Hz, output frequency 200 KHz).

15 modules est hybridé collectivement sur un réseau d'interconnexion. L'utilisation de l'hybridation par bille d'indium permet l'auto alignement de l'ensemble des sous modules de détection en conservant le pas de 30 μm dans la zone d'aboutage, sans pixel manquant.

Contrairement à la technologie standard pour laquelle les circuits de détection sont connectés aux circuits de lecture directement, pour ce composant la connexion se fait via le réseau d'interconnexion.

Les performances électro-optiques obtenues sur ces composants sont excellentes comme l'illustre l'histogramme de sensibilité thermique (NETD) présenté en Fig. 5. Une sensibilité de 10 mK est obtenue en moyenne avec très peu de dispersion et 100 % d'opérabilité en bande 3–5 μm .

Des résultats équivalents ont été obtenus pour des détecteurs opérant en bande 8–10 μm : sensibilité moyenne 9.9 mK (température 77 K, angle de vue 14° , temps d'intégration : 6.5 ms, fréquence trame 80 Hz, fréquence de sortie 200 KHz) avec un taux de défauts légèrement plus élevé : opérabilité 99.5 %.

Les composants réalisés utilisent une variante technologiques permettant de réduire le courant d'obscurité des détecteurs de façon importante par rapport à la technologie standard [6,2], augmentant encore la sensibilité pour ce type d'application utilisant des angles de vues très faibles de 14° .

Ces composants très haut de gamme sont en cours d'évaluation par l'ONERA.

3.2. Matrices bispectrales (bande 3–5 μm)

Il y a actuellement un intérêt croissant pour le développement de matrices de détecteurs infrarouge bicolores opérant dans diverses bandes spectrales. L'observation d'une scène infrarouge thermique dans plusieurs bandes spectrales permet, à la différence de l'observation monospectrale, une détermination de la température absolue de la scène. Ce type de composant intéresse d'une part les militaires pour pouvoir discriminer une cible d'un leurre, d'autre part des utilisateurs potentiels civils (observation de la terre depuis l'espace pour l'écologie).

Les solutions déjà disponibles de matrices multispectrales consistent à utiliser plusieurs matrices monospectrales et à réaliser une superposition d'images. Ces systèmes sont complexes et coûteux (optique, cryogénie, ...).

Les solutions actuellement développées (principalement aux USA) utilisent des matrices de senseurs pour lesquelles chaque pixel est capable de détecter simultanément ou séquentiellement deux longueurs d'ondes infrarouge. Des matrices IRCMOS de format mégapixel sont même envisagées à long terme opérant en intra bande 3–5 μm , intrabande 8–12 μm et bi-bandes 3–5 μm –8–12 μm .

L'architecture hybride des composants bispectraux est globalement identique à celle des composants monospectraux décrite à la Section 2. La différence essentielle de cette technologie réside dans la fabrication du point élémentaire de détection dans le semiconducteur HgCdTe.

L'empilement métallurgique nécessaire est constitué de plusieurs couches de HgCdTe de compositions et de dopages différents. De tels empilement multi-hétérojonctions ne sont pas accessibles avec la technique de croissance conventionnelle classique d'épitaxie liquide utilisée en filière standard, et impose impérativement l'utilisation de l'épitaxie par jets moléculaires. Cette technologie est disponible au LETI qui a d'ailleurs été le précurseur dans ce domaine pour la croissance du HgCdTe dans les années 1980.

Par ailleurs, l'isolation de chaque point élémentaire par gravure « mesa » est également nécessaire, à la différence de la technologie monospectrale qui est entièrement « planar ».

Le schémas de l'architecture du pixel développé au LETI [3,7] est représenté sur la Fig. 6.

La structure npn réalisée permet d'adresser sélectivement et séquentiellement la diode photovoltaïque du haut (longueur d'onde de coupure 5 μm) et celle du bas (longueur d'onde de coupure 3 μm) en jouant sur le point de polarisation. L'éclairage étant fait en face arrière à travers le substrat, les photons de longueur d'onde inférieure à 3 μm sont absorbés par la diode du bas alors que ceux de longueur d'onde 3–5 μm traversent la structure pour être absorbés par la diode du haut.

La polarisation séquentielle de chaque pixel est réalisée par un circuit de lecture spécifique qui a été spécialement conçu pour ce type d'application.

Le LETI a réalisé en 2002 un prototype de composant matriciel IRCMOS de format 128×128 pixels au pas de 50 μm opérant dans les bandes 3 et 5 μm . Le pas de 50 μm étant limité par la technologie de gravure utilisée.

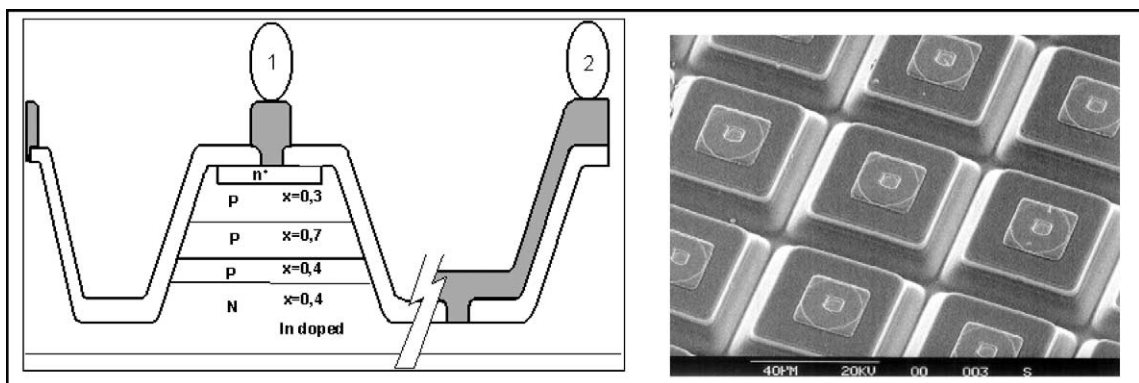


Fig. 6. Schéma du détecteur bispectral $\text{Hg}_{(1-x)}\text{Cd}_x\text{Te}$ développé par le LETI (intrabande 3–5 μm – lecture séquentielle) et photographie au microscope électronique à balayage des photodiodes.

Fig. 6. Schematic of dual band $\text{Hg}_{(1-x)}\text{Cd}_x\text{Te}$ developed by LETI développé (intraband 3–5 μm – sequential reading) and scanning electron microscope photography of photodiodes.

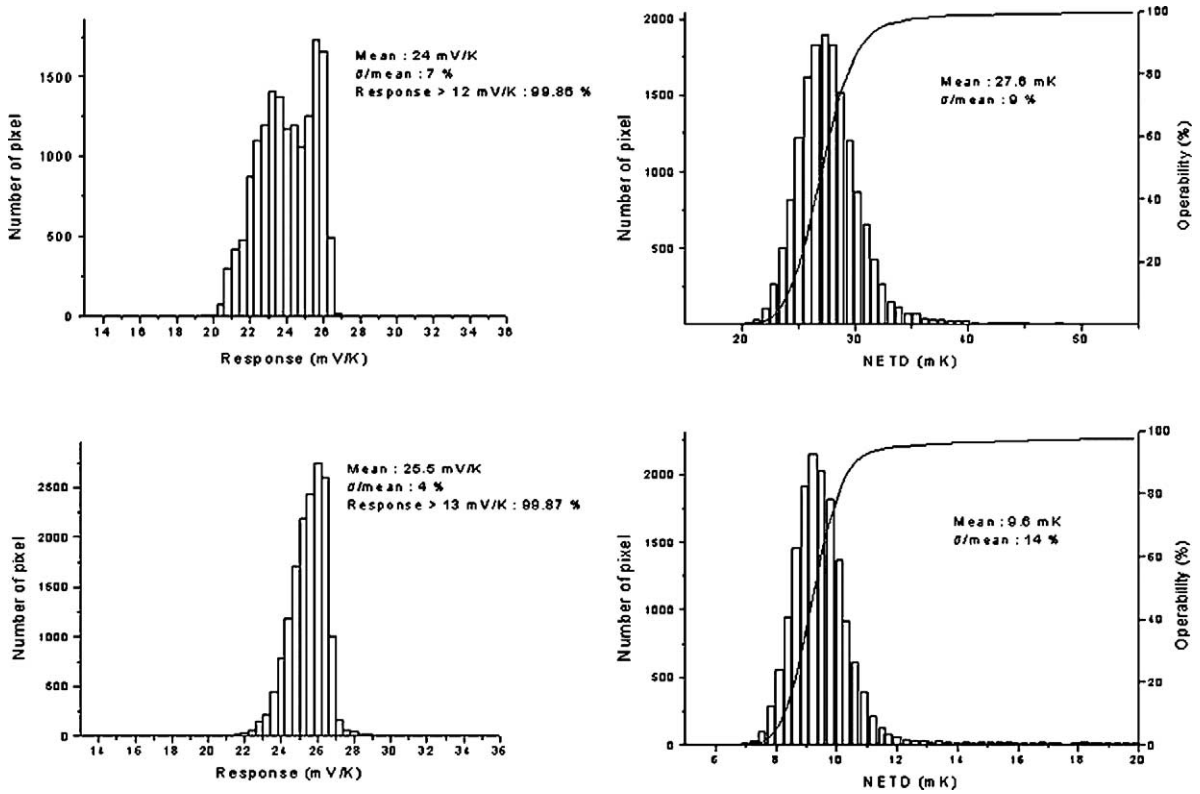


Fig. 7. Performances électro-optiques du senseur bispectral (température 77 K, température de scène 293 K, angle de vue 30°, temps d'intégration respectivement 1 et 4 ms pour les bandes B2 (5 μm) et B1 (3 μm); fréquence trame 72 Hz, fréquence pixel 2,5 MHz écart de temps entre l'intégration en bande B1 et B2 : 2,25 μs . Mode de fonctionnement : snap-shot).

Fig. 7. Electro-optic performances of the dual band sensor (temperature 77 K, background temperature 293 K, field of view 30°, integration times: respectively 1 and 4 ms for B2 band (5 μm) and B1 band (3 μm); imaging frequency 72 Hz, pixel frequency 2.5 MHz time delay between the integrations in band B1 and B2: 2.25 μs . operating mode: snap-shot).



Fig. 8. Image infrarouge bispectrale à cohérence spatiale et lecture séquentielle.

Fig. 8. Dual band infrared imaging with spatial coherence and sequential read out.

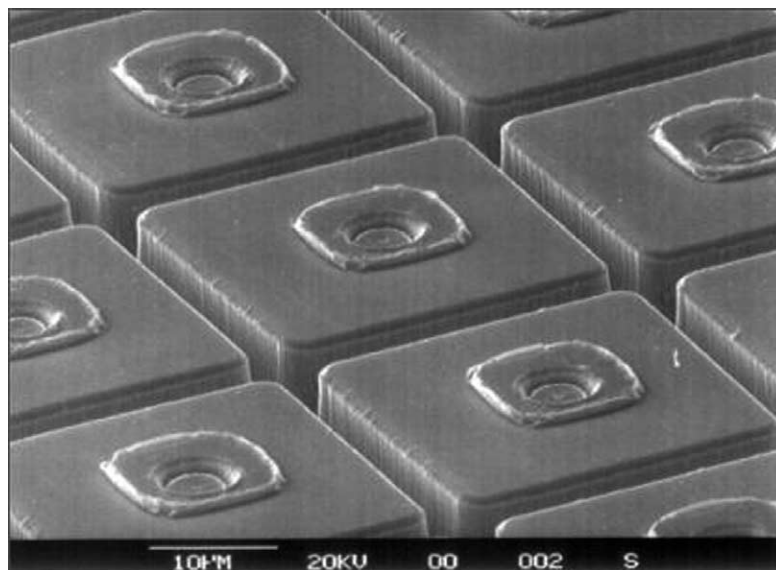


Fig. 9. Gravure anisotrope de HgCdTe.

Fig. 9. Anisotropic etch of HgCdTe.

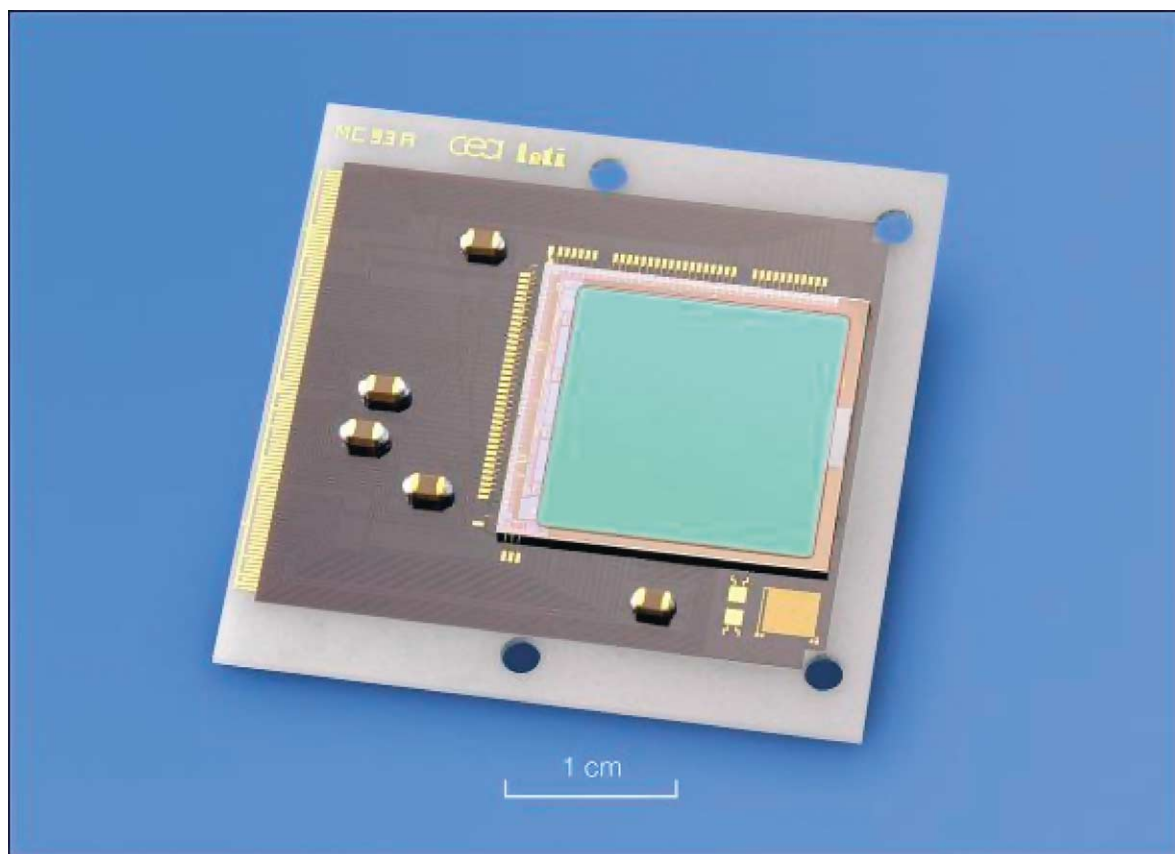


Fig. 10. Premières matrices IRCMOS mégapixels en HgCdTe (pas de 15 μm) réalisées par le LETI (bande 3–5 μm).

Fig. 10. First IRCMOS megapixel arrays made with HgCdTe (pitch 15 μm) made by LETI (band 3–5 μm).

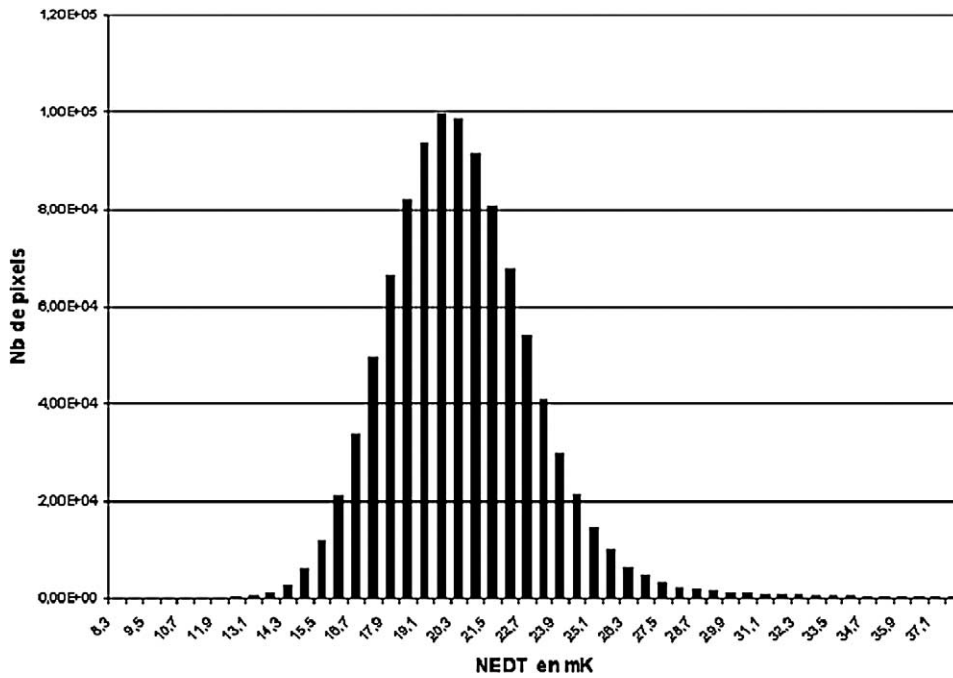


Fig. 11. Histogramme de NEDT de la matrice mégapixel.

Fig. 11. NEDT histogram of the megapixel array.

Les performances obtenues sur ce type de composant sont excellentes en terme d'opérabilité (supérieure à 99,5 %) et de résolution thermique (NEDT) (Fig. 7).

Un exemple d'image prise sur un film infrarouge est montré en Fig. 8 : l'image de gauche est prise en bande 3 μm , celle de droite en bande 5 μm ; on constate la surbrillance de la flamme du briquet qui émet principalement à courte longueur d'onde sur l'image en bande B1 (3 μm).

Des résultats similaires ont été obtenus récemment sur des épitaxies de HgCdTe sur germanium par le LETI.

Actuellement des programmes d'étude important sont en cours au LETI financées par la DGA et le CEA pour la réalisation de matrices de plus grande complexité à pas réduit et opérant dans plusieurs bandes spectrales. Le principal challenge étant le contrôle des gravures sèches pour la réduction du pas.

La Fig. 9 illustre le résultat de travaux récents du LETI pour le contrôle des gravures sèche anisotropes du HgCdTe.

3.3. Matrices mégapixels monospectrales (bande 3–5 μm)

Dans une optique de réduction des coûts et d'accroissement de sensibilité des matrices de détection infrarouge, le LETI travaille depuis de nombreuses années avec le soutien de la DGA et du CEA sur la réduction des pas des pixels des matrices infrarouge monospectrales opérant en bande 3–5 μm . Ces études ont conduit tout d'abord à la réalisation de matrices de format 320 \times 240 pixels au pas de 30 μm puis 640 \times 480 pixels au pas 20 μm . Ces formats sont aujourd'hui disponible chez Sofradir au niveau industriel [8].

Plus récemment le LETI a mis au point un nouveau procédé d'hybridation et de technologie détecteur HgCdTe permettant la réduction du pas des détecteurs à 15 μm et ceci pour des formats aussi grands que 1024 \times 1024 pixels [3,9].

La première démonstration de faisabilité au monde d'une matrice IRCMOS mégapixels au pas de 15 μm opérant en bande 3–5 μm a été réalisée au premier semestre 2002 au LETI (Fig. 10). Un circuit de lecture spécifique a été spécialement conçu et réalisé pour ce prototype.

Les performances obtenues sont les performances théoriques en terme de sensibilité thermique avec une opérabilité de 99,8 % (Fig. 11).

La Fig. 12 illustre la qualité des images thermiques accessibles avec ce type de senseur.



Fig. 12. Image infrarouge mégapixel.

Fig. 12. Infrared megapixel image.

3.4. Matrices en bande 3–5 μm en hétéroépitaxie de HgCdTe sur germanium

Dans une optique d'accroissement de taille des matrices infrarouge et de réduction des coûts, le LETI a réalisé des études de croissance de HgCdTe en épitaxie par jets moléculaires de HgCdTe sur germanium [3,4].

Ce substrat a été préféré au silicium car il présente un oxyde beaucoup moins stable que SiO_2 , facilitant considérablement l'étape très critique de préparation de surface avant épitaxie.

Le désaccord de maille important entre le germanium et le CdTe/HgCdTe (14 %) conduit à la réalisation d'épitaxie présentant une densité de dislocation de l'ordre de 10^7 cm^{-2} (2 à 3 ordres de grandeurs par rapport à aux homoépitaxies sur CdZnTe), tolérable pour la réalisation de détecteurs opérant en bande 3–5 μm à basse température. Le germanium est aujourd'hui disponible en tranches de 20 cm de diamètre avec une qualité équivalente au silicium, laissant envisager une réduction importante des coûts de fabrication des matrices HgCdTe de format 1000×1000 , 640×480 mais aussi 320×256 .

Le LETI a montré la démonstration de faisabilité de la croissance en 2 et 3 pouce de HgCdTe sur germanium et la possibilité de réaliser sur ce type de matériau des composants de qualité équivalentes à ceux faits sur des épitaxies élaborées en phase liquide.

La Fig. 13 illustre ce résultat pour une matrice de format 320×240 pas de 30 μm qui présente les performances théoriques et moins de 0.1 % de défauts seulement.

Actuellement, avec le soutien de la DGA, le LETI réalise des études de croissance en épitaxie par jets moléculaires de HgCdTe sur un bâti 5 pouces pour accéder en particulier à la réalisation de tranches sur germanium de dimension 4–5 pouces.

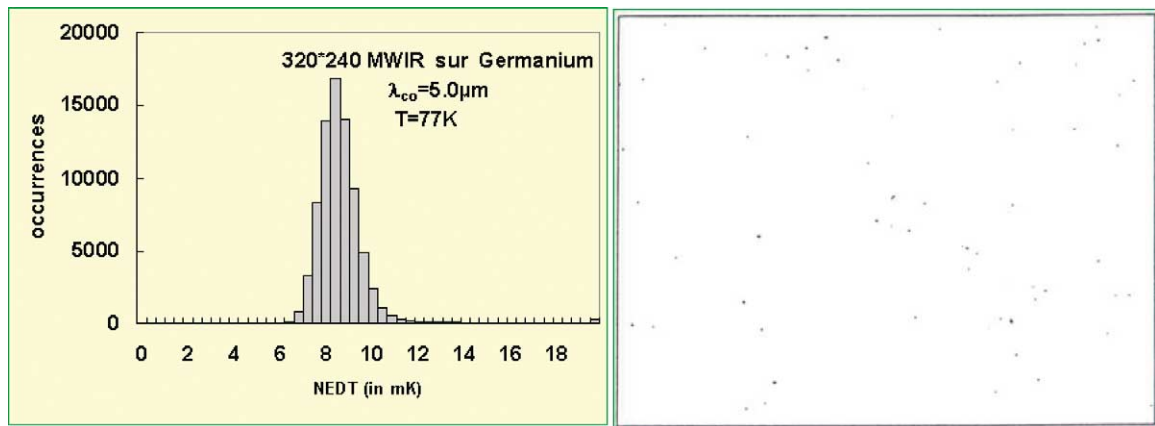


Fig. 13. Histogramme de NEDT sur une matrice 320×240 réalisée par le LETI en HgCdTe sur germanium.

Fig. 13. NEDT histogram of a 320×240 HgCdTe array made by LETI on germanium substrates.

4. Conclusion

Les détecteurs infrarouge très hautes performances refroidis réalisés en filière HgCdTe ont atteint une maturité technologique qui permet aujourd'hui leur production industrielle en particulier en France par la société Sofradir. Les formats d'imagerie infra rouge IRCMOS HgCdTe de format 320×240 pixels et 640×480 pixels sont déjà commercialement disponibles. La production industrielle a permis ces dernières années une réduction significative des coûts des détecteurs refroidis. Ces coûts restent toutefois encore nettement plus élevés que ceux des détecteurs de type non refroidis à base de microbolomètres. Mais les sensibilités des deux types de détecteurs sont encore très sensiblement différentes (dans des conditions opératoires équivalentes), les domaines de longueurs d'ondes couverts différents et les domaines d'application visés ne sont pas les mêmes.

Les recherches menées actuellement conduisent à la réalisation de nouveaux senseurs à base de HgCdTe de complexité considérablement accrues : matrices mégapixels, matrices bicolores, barrettes linéaires très hautes résolutions, ... Leurs développements sont en cours et ils équiperont dans les années qui viennent les prochaines générations de systèmes de détection infrarouge hautes performances militaires et civils.

Les accords récents entre le CEA/LETI et Sofradir ont abouti à la création d'un laboratoire commun d'envergure qui optimisera les travaux de recherche menés dans ce domaine au cours de cette décennie.

Remerciements

Mes remerciement vont naturellement à l'ensemble du personnel du Laboratoire Infrarouge du LETI et de Sofradir. Ils vont également à l'Onera avec qui nous avons des travaux en commun depuis de nombreuses années. Ces travaux sont financés par la DGA, le CEA et Sofradir.

Références

- [1] G. Destefanis, HgCdTe infrared diodes arrays, *Semicond. Sci. Technol.* 6 (1991) 88–92.
- [2] G. Destefanis, J.P. Chamonal, Large improvement in HgCdTe photovoltaic detector performance at LETI, *J. Electron. Mater.* 22 (8) (1993).
- [3] G. Destefanis, A. Astier, P. Castelein, J.P. Chamonal, E. Deborniol, O. Gravrand, F. Marion, J.L. Martin, A. Million, P. Rambaud, F. Rothan, J.P. Zanatta, Recent developments of high complexity HgCdTe focal plane arrays at LETI infrared laboratory, *J. Electron. Mater.* (2003) in preparation.
- [4] P. Ferret, J.P. Zanatta, R. Hamelin, S. Cremer, A. Million, M. Wolny, G. Destefanis, Status of the MBE technology at Leti LIR for manufacturing of CdHgTe focal plane arrays, *J. Electron. Mater.* 29 (6) (2000) 641–647.
- [5] P. Castelein, P. Rambaud, J.P. Chamonal, M. Ravetto, M. Caes, G. Destefanis, New generation of long linear butted HgCdTe arrays for high resolution infrared imaging, in: *Proc. SPIE*, Vol. 4721-32, 2002.
- [6] G. Destefanis, Electrical doping of HgCdTe by ion implantation and heat treatment, *J. Crystal Growth* 86 (1988) 700–722.
- [7] J. Baylet, E. Deborniol, O. Gravand, A. Million, F. Rothan, J.P. Zanatta, G. Destefanis, Dual band infrared HgCdTe; Focal plane arrays, in: *Proc. SPIE*, Vol. 4820-56, 2002.

- [8] P. Tribolet, P. Bensussan, G. Destefanis, in: Sofradir approach for the 2.5 and 3th generation of IR detectors, Proceedings of the 5th Military Sensing Symposia, in press.
- [9] F. Marion, P. Rambaud, J.P. Zanatta, P. Castelein, J.L. Martin, O. Gravrand, A. Durand, J.P. Chamonal, G. Destefanis, A megapixel MWIR focal plane array with a 15 μm pitch, Proc. SPIE, 2003, in press.