

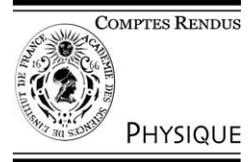


ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Physique 4 (2003) 1077–1082



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

Prospective sur les besoins « défense » en détecteurs infrarouge

Jean-Christophe Peyrard

*Délégation générale pour l'armement, service des stratégies techniques et des technologies communes,
8, boulevard Victor, 00303 Armées, 75015 Paris, France*

Présenté par Guy Laval

Résumé

Cet article se propose de présenter une prospective sur les besoins moyen terme en matière de détecteurs infrarouge. Ces besoins seront déclinés à partir des évolutions prévisibles des techniques d'imagerie ainsi qu'à partir des exigences opérationnelles. Les principales tendances qui doivent orienter les travaux en détection infrarouge sont autant la recherche de portée plus importante, une meilleure discrimination des cibles, que la recherche de la minimisation des coûts, volume, poids et consommation. Ces tendances nous conduiront à examiner les besoins correspondants en détecteurs « intelligents ». Parmi les applications concernées on s'intéressera plus particulièrement à l'imagerie flash et 3D, l'imagerie hyperspectrale et l'imagerie non refroidie. *Pour citer cet article : J.-C. Peyrard, C. R. Physique 4 (2003).*

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

Abstract

Mid-term defence needs for infrared detectors. In this paper, we propose to present the prospects for mid-term needs for infrared detectors. These needs are derived from expected evolutions in imaging techniques as well as from operational requirements. The main trends that shall allow the direct development in infrared detection are as much the pursuit of greater range, a better discrimination of targets, as the efforts to minimize cost, volume, weight and consumption. These trends will lead to an examination of the specific needs for some kind of 'smart' infrared detector. Among these applications, we will investigate more deeply the technological requirements for flash and 3D imaging, hyperspectral and uncooled imaging. *To cite this article: J.-C. Peyrard, C. R. Physique 4 (2003).*

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

Mots-clés : Technologie infrarouge ; Technologies multispectrales ; Imagerie active ; Technologies non refroidies

Keywords: Infrared technology; Multispectral technology; Active imaging; Uncooled technology

1. Introduction

Cette présentation va commencer par un très synthétique état des lieux destiné essentiellement à poser le point de départ à partir duquel, on pourra décliner des éléments de la prospective. L'état de l'art technologique sera essentiellement présenté en terme de disponibilité des détecteurs dans les équipements infrarouge actuels.

Dans un deuxième temps, on abordera la prospective proprement dite. Pour cela nous partirons des besoins génériques soit en termes de performances intrinsèques pour l'amélioration des portées de *détection-reconnaissance-identification* (DRI), et pour une meilleure discrimination, soit en termes de coût, autonomie, poids, permettant d'envisager de nouvelles applications grâce à une plus large diffusion de ces équipements. A ces besoins opérationnels seront associés des axes technologiques concernant

Adresse e-mail : jean-christophe.peyrard@dga.defense.gouv.fr (J.-C. Peyrard).

soit directement le détecteur soit une technique d'imagerie à partir de laquelle seront déclinées les spécifications que doit alors remplir le détecteur.

Il faut souligner d'emblée le caractère très prospectif de cet exercice, les solutions et les spécifications mentionnées restent très ouvertes et non exhaustives ; elles s'appuient sur des données aujourd'hui très embryonnaires ou sur des concepts pas encore totalement définis. Malgré tout, étant donné la durée de développement des nouvelles filières de détecteur, il est nécessaire d'anticiper au plus tôt les orientations technologiques qui pourront répondre aux besoins qui s'esquissent aujourd'hui.

2. Survol sur la disponibilité actuelle des détecteurs infrarouge refroidis

En matière de détection infrarouge, l'état de l'art actuel recouvre essentiellement les détecteurs monospectraux, large bande et mis en œuvre dans des conditions standard.

Par large bande, il faut entendre les bandes classiques de l'infrarouge (correspondant aux bandes de transmission de l'atmosphère) entre 3 et 5 μm d'une part et entre 8 et 10 μm d'autre part, ou éventuellement une sous-bande de largeur spectrale de l'ordre de 1 μm à l'intérieur de ces dernières. Ces sous-bandes peuvent être obtenues soit par filtrage spectral (cas du HgCdTe) pour des besoins spécifiques dans la bande 3–5 μm , soit par leur propre bande spectrale d'absorption (cas des multipuits quantiques pour la bande 8–10 μm).

Ces détecteurs sont prévus aujourd'hui pour fonctionner dans des conditions standard, c'est-à-dire pour des flux de scène, des temps d'intégration et des températures de plan focal permettant un fonctionnement optimal avec les structures actuelles de photodétecteurs, qu'ils soient photovoltaïques (HgCdTe) ou photoconducteurs (multipuits quantiques), et des circuits de lecture à injection directe. Nous n'aborderons pas ici l'émergence des applications civiles dans les courtes longueurs d'onde.

2.1. Bande 3–5 μm

Les détecteurs couvrant cette bande sont essentiellement au format matriciels. En France, cela concerne la technologie HgCdTe. Des formats de type 320 \times 240 au pas de 30 μm , produits en France depuis 5 ans, en passant par des matrices 640 \times 480 au pas de 20 μm en cours de production, pour arriver d'ici 3 ans à des formats de type 1000 \times 1000 au pas de 15 μm . Cette dernière étape devrait être l'ultime au niveau de la réduction du pas pour le moyen infrarouge et ceci autant pour des raisons technologiques que vis-à-vis de la limite de diffraction.

Ce type de détecteur équipe actuellement des équipements tels que autodirecteurs de missiles, systèmes d'observation, caméras de hautes performances, caméras de conduites de tir ou caméra portables.

2.2. Bande 8–10 μm

Aujourd'hui, on dispose essentiellement de barrettes HgCdTe TDI (time delay integration) c'est-à-dire intégrant et accumulant les charges avec un délai temporel. Les formats classiques sont les composants 288 \times 4 et 480 \times 6. C'est une technologie qui, pour ces formats barrettes, est complètement mature ; elle équipe aujourd'hui de nombreux équipements, des caméras portables jusqu'aux caméras de hautes performances.

Depuis quelques années apparaît également la technologie de détecteurs à puits quantiques dédiée aux formats matriciels ; plus récente et susceptible d'optimisation, ses applications apparaissent relativement complémentaires de la technologie HgCdTe. Elle s'en distingue en particulier par des conditions optimales de mise en œuvre différentes de celles requises par les détecteurs HgCdTe (en particulier le temps d'intégration dû à un rendement quantique inférieur, toutes choses étant égales par ailleurs).

Aujourd'hui émergent des exigences de détection/identification qui excèdent les possibilités de l'imagerie telles que précédemment exposées, elles requièrent de nouvelles techniques d'imagerie (multi/hyper spectrales ou imagerie active) pour lesquelles il convient d'anticiper les besoins associés de détecteurs.

3. Axe multispectral

Face aux progrès de discrétion, à l'amélioration de la furtivité, au camouflage ou au leurrage, la détection multispectrale constitue une réponse à fort potentiel permettant de discriminer des cibles noyées dans un environnement complexe. Les configurations multispectrales (essentiellement le choix des bandes spectrales, leur largeur, leur cohérence spatiale et temporelle) sont à adapter en fonction du type d'application visé. Par exemple, dans le cas de cibles aériennes, que l'on veut en particulier discriminer vis-à-vis de leurres, on privilégiera des sous-bandes spectrales comprises dans la bande 2–5 μm plus adaptées aux objets chauds. En revanche, pour des cibles terrestres furtives ou camouflées, on choisira préférentiellement des

sous-bandes spectrales dans les deux bandes 3–5 μm et/ou 8–12 μm . Plus spécialement dans ce dernier cas, il est difficile de s'arrêter sur un choix définitif quant à la combinaison des sous-bandes spectrales. En effet, si la plus-value de la multispectralité est réelle, elle est difficilement quantifiable a priori. Elle dépend d'une série de paramètres non maîtrisables tels que les contrastes thermiques (dépendant de la température, des matériaux et états de surface), les conditions climatiques et les perturbations de l'environnement (fumée, feux, reflets solaires, ...) qui rendent impossible à définir de façon générale toute quantification de l'intérêt de la détection multispectrale.

S'il existe actuellement quelques systèmes bispectraux, ceux-ci comportent autant de plans focaux que de bandes spectrales, ce qui conduit à des équipements complexes et volumineux. Or, l'état de l'art technologique permettrait dès aujourd'hui d'envisager des détecteurs matriciels bispectraux (avec cohérence spatiale) quelle que soit la configuration spectrale retenue. Les deux filières privilégiées, permettant de réaliser des empilements bispectraux par adaptation de la longueur d'onde de coupure, sont les filières HgCdTe et multipuits quantiques.

Malgré tout, si des démonstrateurs existent aux États-Unis depuis près de 5 ans, les détecteurs multispectraux ont du mal à intégrer de véritables applications opérationnelles. On peut identifier trois freins à la diffusion des détecteurs multispectraux :

- un frein technologique : en effet, si l'on est à même aujourd'hui de réaliser des détecteurs bispectraux, les spécifications en performances pour chacune des bandes spectrales prennent pour référence les performances actuellement offertes par les détecteurs monospectraux large bande, ce qui est un niveau d'exigences difficile à atteindre pour une technologie plus complexe et moins mature ;
- un frein théorique : comme déjà mentionné, la plus value du bispectral par rapport au monospectral est difficilement prédictible et quantifiable car dépendant d'un grand nombre de paramètres de contexte ;
- un frein opérationnel : la mise en œuvre de la détection bispectrale ne peut s'appuyer que sur une très faible expérience. La question qui se pose est alors : comment assurer l'exploitation des informations qui parviennent sur les deux voies pour bénéficier réellement de la bispectralité ? l'alternative étant soit l'exploitation conjointe des images et dans ce cas selon quels principes, soit laisser au choix de l'opérateur (lorsqu'il y en a un) de switcher sur l'une ou l'autre des images en fonction de la richesse d'information apparente. Il est vraisemblable que le choix ne peut être universel mais doit être adapté en fonction des différents types d'applications et des conditions contingentes opérationnelles.

On le voit, si la plus-value de la détection multispectrale est potentiellement importante, elle a encore beaucoup à démontrer, cette démonstration ne pouvant se faire qu'en acquérant de l'expérience.

On a parlé jusqu'ici exclusivement de multispectralité et même essentiellement de bispectralité, première étape vers l'hyperspectralité.

Que peut-on dire aujourd'hui des perspectives concernant les détecteurs hyperspectraux ? Si par hyperspectralité, on entend l'imagerie de scènes dans plusieurs bandes spectrales très étroites de l'infrarouge (de quelques dizaines de nanomètres à cent nanomètres), on peut définir des prérequis quant aux spécificités des détecteurs. Ceux-ci devront être rapides (pour analyser les multiples bandes spectrales) et ils devront être performants à faibles flux photoniques (selon les largeurs spectrales analysées) ; la fonction de sélection de bandes spectrales pouvant être notamment assurée par des filtres interférentiels. Si à ce degré de généralités, on ne peut éliminer aucun candidat, la technologie HgCdTe présente a priori, de par son fort rendement quantique et sa versatilité en longueur d'onde, tous les atouts nécessaires. L'avenir de cette technologie passe, encore davantage que pour le multispectral, par une meilleure connaissance de la spectroradiométrie des cibles et des fonds.

4. Axe imagerie active

De façon très générique, l'imagerie active est l'imagerie de la rétrodiffusion par une scène éclairée artificiellement. Pourquoi faire de l'imagerie active alors que l'imagerie passive donne de bons résultats et offre l'intérêt de la discrétion ?

On veut avant tout augmenter les portées de détection, de reconnaissance et d'identification. Or la plupart des équipements optroniques militaires sont limités par la diffraction. Si on prend à titre d'exemple la bande 3–5 μm , on ne peut distinguer que des objets de taille supérieure au mètre à une dizaine de kilomètres pour une pupille standard de 10 cm. L'idée est donc de diminuer la longueur d'onde vers le proche infrarouge (puisque la tâche de diffraction est proportionnelle à la longueur d'onde). Or selon la loi d'émission du corps noir, le flux photonique émis par un corps à 300 K diminue dramatiquement quand on diminue la longueur d'onde. Quelques ordres de grandeur : pour une scène à 300 K, on a 4000 fois moins de photons quand on passe de la bande 3–5 μm à la bande 1–2,5 μm et 8×10^4 de la bande 8–10 μm à la bande 1–2,5 μm . D'où la nécessité d'apporter une source de photons complémentaires et de détecter non plus les photons émis mais ceux rétrodiffusés par la scène. Un autre avantage de ce type d'imagerie est d'être moins sensible aux variables non maîtrisées telles que température de la cible, conditions climatiques, furtivité, ...

Quelles sont les spécificités de ce type d'imagerie ? :

- on se situe dans la bande entre 1 et 2 μm ; le choix précis dépendant de la disponibilité d'une source adaptée, de la volonté d'être dans le domaine à sécurité oculaire (au-dessus de 1,5 μm), de la disponibilité des détecteurs (principalement HgCdTe, InGaAs et phototubes) et bien sûr des conditions de propagation ;
- il faut un capteur capable d'isoler le flux rétrodiffusé du flux ambiant ou de la diffusion du faisceau sur le trajet d'où la nécessité de filtres spectraux très étroits et de fenêtres temporelles très courtes ;
- en fonction de la distance de la scène à imager et de la puissance du laser, on peut se situer dans des domaines de faibles flux. Pour l'illustrer, nous pouvons distinguer trois régimes de flux correspondant à trois régimes de fonctionnement d'un détecteur. Quelques ordres de grandeur pour un temps d'intégration de l'ordre d'une microseconde :
 - pour des flux supérieurs à quelques 10^4 photons par pixel (condition très favorable de courte portée), alors les détecteurs existants optimisés en longueur d'onde sont adaptés ;
 - pour des flux compris entre quelques dizaines de photons et quelques 10^4 photons par pixel, le capteur doit avoir un circuit de lecture faible bruit en condition de faible flux ; l'injection directe classiquement utilisée ne convient plus et doit alors être remplacée par d'autres types de mode d'injection, ces solutions existent mais restent à implémenter ;
 - pour des flux inférieurs à quelques dizaines de photons par pixel (condition longue portée), les modifications du circuit de lecture ne suffisent pas à traiter aussi peu de photo-électrons ; il faut alors utiliser des détecteurs à gain interne tels que des photodiodes à avalanches, ce qui nécessite des travaux tant théoriques que technologiques.

Nous avons décrit jusqu'ici l'imagerie active de façon générale en ne s'attachant qu'à la fonction d'imagerie analogue à celle accessible en imagerie passive. Mais l'imagerie active permet d'envisager d'accéder à d'autres informations telles que l'information distance, et si on a cette information sur chaque pixel, on obtient alors une vraie imagerie 3D. L'apport de la troisième dimension devrait permettre de mieux identifier les cibles, de mieux les décamoufler, elle a également une certaine capacité à pénétrer des rideaux de végétation.

Parmi les solutions techniques à mettre en œuvre, on peut mentionner d'une part la prise de n images séparées de la distance de résolution souhaitée en profondeur (voir illustration Fig. 1), soit typiquement 15 cm ce qui fait une cadence image de l'ordre du GHz, il faut alors distribuer ces n images vers n circuits de lecture ; cette solution apparaît envisageable pour de petits formats et pour un nombre limité de plans images dans la profondeur ; des limites photométriques vont également apparaître très rapidement. Une autre solution consiste à réaliser pour chaque pixel de l'image sa propre télémétrie, avec la même résolution que précédemment (soit typiquement de l'ordre de 1 ns) ; l'architecture pixel est alors à inventer pour réaliser ce traitement à cette cadence.

Ainsi, quelque soit la solution retenue, il faudra un circuit de détection très rapide et une architecture pixel rapide et/ou complexe. Au stade actuel des réflexions, la solution retenue doit de toute façon résulter d'une interaction entre la faisabilité technologique du plan focal et la méthode d'imagerie pour réaliser cette fonction 3D au niveau de l'équipement. C'est un domaine qui reste donc très ouvert à l'innovation à la fois des techniques d'imagerie (complexité et rapidité de traitements) et des technologies de plan focal (rapidité et capacité à gérer de très faibles flux).

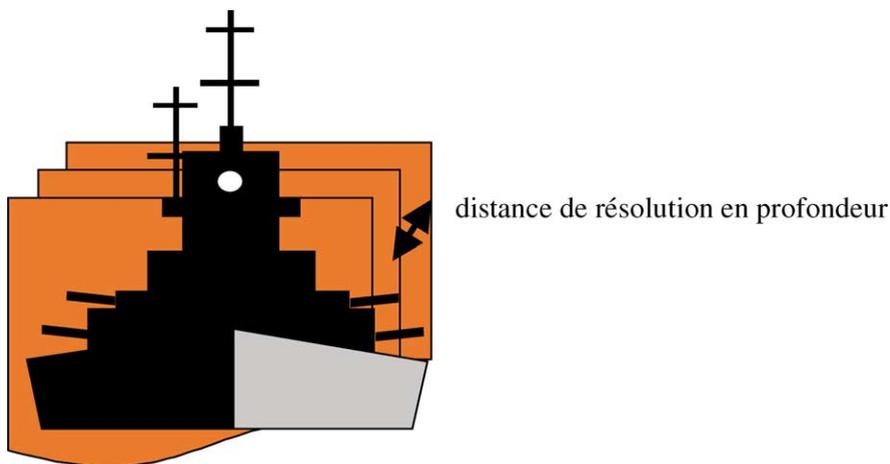


Fig. 1. Illustration de l'imagerie 3D.

5. Axe non refroidi

Les technologies de détecteurs non refroidis adressent des applications traditionnelles telles que : jumelles pour l'équipement du fantassin, lunettes pour armes de petit calibre, etc., mais également des applications émergentes telles que les capteurs abandonnés, les drones, le guidage terminal de munitions. Ces applications requièrent, avec des priorités différentes, des niveaux de performances ou de contrainte que le non refroidi offre potentiellement. Parmi ceux-ci, on peut citer, le faible coût permettant une large diffusion, la faible consommation assurant une grande autonomie, une importante durée de vie sans entretien, un volume et un poids réduits, un faible temps de mise en route, une bonne discrétion acoustique.

Aujourd'hui, c'est la filière bolométrique (où on exploite la variation de résistance avec la température) qui s'impose comme technologie de référence pour la détection non refroidie, laissant à l'arrière plan toutes les autres technologies potentielles (pyroélectrique, ferroélectrique, diodes, thermocouples, ...). Cette technologie est marquée par la très forte évolution de ses performances depuis 5 ans, comme le montre la Fig. 2.

Si pour la première génération (100 mK de NETD pour un pas de 50 µm), le Royaume-Uni était, avec les États-Unis, leader mondial, pour les générations suivantes, seule la France est présente face aux États-Unis.

Aujourd'hui, le matériau des microbolomètres français (LETI et ULIS) est le silicium amorphe dont l'avantage est son entière compatibilité avec des procédés de la microélectronique silicium. Les États-Unis ont préféré opter pour les meilleures performances (en terme de bruit basse fréquence) offertes par l'oxyde de vanadium au risque de rendements de fabrication inférieurs.

Malgré tout, le silicium arrive en butée pour passer à la génération suivante (20 mK pour des pas de 25 µm), performances requises pour accroître les portées et la compacité de l'équipement et donc étendre le nombre d'applications potentielles. Il faut donc trouver un matériau qui offre à la fois des performances au moins aussi bonnes que celles obtenues ultimement avec l'oxyde de vanadium et une facilité de process comparable au silicium amorphe. Ainsi, en plus de sa compatibilité avec les process de la microélectronique, les principaux paramètres permettant d'atteindre les performances escomptées (au moins 20 mK pour un pas de 25 µm) sont :

- $\frac{1}{R} \times \frac{dR}{dT}$ (la variation relative de résistance avec la température) ;
- la résistivité électrique et le bruit basse fréquence.

On ne voit pas encore aujourd'hui d'inflexion à la progression des performances ; les limites intrinsèques de performances que l'on peut obtenir avec des bolomètres ne sont pas définies. La question sous-jacente est : jusqu'à quel degré le non refroidi peut-il concurrencer les détecteurs refroidis ?

L'enjeu est important non seulement dans le domaine militaire où, en fonction des performances accessibles, ce sont de nouvelles applications potentielles qui s'ouvriront, mais également dans le domaine civil, puisque de bonnes performances permettent de gagner en compacité et donc aussi en coût de l'équipement complet. L'enjeu est d'autant plus important que la France est aujourd'hui la seule alternative aux sources américaines même si celles-ci gardent une avance manifeste dans ce domaine (comme le montre le point de référence dans la Fig. 2). La course technico-économique reste malgré tout ouverte ;

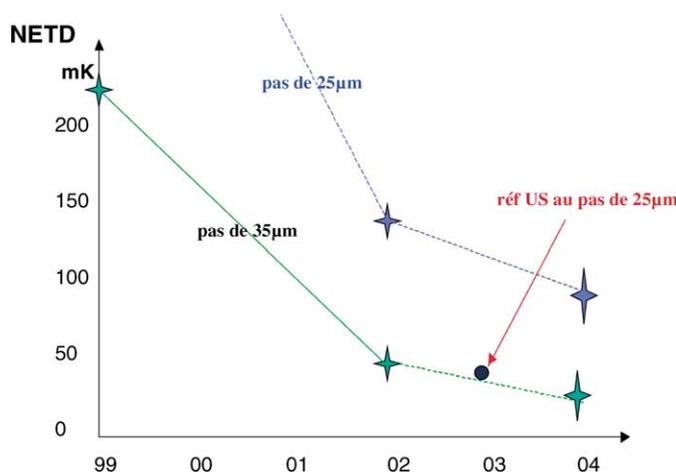


Fig. 2. Evolution des performances (sensibilité thermique au pas de $f/1$) de la technologie française pour deux tailles de pas pixels et référence américaine actuelle.

en effet, cette technologie est encore susceptible d'importantes évolutions aussi bien en performances qu'en facilité de mise en œuvre (compacité, intégration en boîtier, suppression de la régulation de température, . . .), et donc aussi en coût de possession.

Même si, comme précisé ci-dessus, plusieurs caractéristiques sont requises pour aboutir à des bolomètres performants, l'apparition d'un meilleur matériau dans les prochaines années est probable ; aussi, ce domaine de recherche reste actif et prometteur.

6. Conclusion

Nous avons évoqué trois axes principaux de technologie de détecteurs, chacun associé à une technique d'imagerie en voie de développement. Les deux premiers concernent quasi exclusivement les technologies refroidies à base de HgCdTe et puits quantiques. Dans le cas des détecteurs multispectraux, si on ne voit pas de points bloquants quant à la technologie, leur développement est essentiellement conditionné à de meilleures connaissances, que ce soit au niveau des signatures ou au niveau de la mise en œuvre opérationnelle. Pour l'imagerie active 2D et 3D, l'avenir dépend plutôt des futurs développements technologiques requis par la nécessité d'avoir des détecteurs à gain interne et pouvant traiter de très faibles signaux dans une grande dynamique et très rapidement. Les détecteurs non refroidis quant à eux sont promis à un développement très important de par la synergie qu'il faut préserver avec les marchés civils. Si, les technologies des premières générations de détecteurs non refroidis sont disponibles en France, les États-Unis disposent d'une longueur d'avance en terme de performances, aussi est-il indispensable de mettre au point la technologie de la génération suivante, celle-ci passe par la mise en œuvre d'un nouveau matériau.

La France dispose d'atouts uniques en Europe par son niveau de compétences dans les filières HgCdTe, puits quantiques et microbolomètres. Elle est donc naturellement bien placée pour répondre aux nouveaux défis technologiques, même si avec des moyens très inférieurs à ceux déployés par les États-Unis, elle n'a pas le droit à l'erreur quant aux futurs choix technologiques, et doit compter sur une indispensable solidarité entre les principaux acteurs français du domaine (des laboratoires universitaires ou étatiques aux industriels composants ou équipementiers).