

ACHETER

Une caméra térahertz (THz)

François SIMOENS
CEA-Leti, Minatec Campus,
Université Grenoble Alpes,
17, rue des Martyrs,
38054 Grenoble, France
francois.simoens@cea.fr

De nombreux laboratoires de recherche académiques utilisent des caméras térahertz pour la caractérisation de sources, l'alignement des bancs optiques, l'étude de phénomènes physiques... En parallèle, de plus en plus d'équipes de recherche appliquée, dans les instituts de R&D et chez des industriels, mettent en œuvre ces caméras pour investiguer des applications de l'imagerie térahertz dans des domaines variés comme la sécurité, le contrôle non destructif, l'environnement ou la santé. En réponse à ces besoins, une offre commerciale de caméras térahertz non refroidies commence à monter en maturité.

Dans le spectre des ondes électromagnétiques, le domaine du térahertz n'est pas défini de manière normative : il s'étend d'environ 100–300 GHz à une dizaine de térahertz (1 térahertz (THz) = 1000 gigahertz), couvrant partiellement les bandes millimétriques et sub-millimétriques jusqu'au voisinage de l'infrarouge (IR). Cela correspond à des longueurs d'onde comprises entre quelques dizaines de micromètres et une dizaine de millimètres.

Ce rayonnement présente des propriétés singulières : un pouvoir élevé de pénétration à travers de nombreux matériaux non métalliques et non polaires (tels que le papier, les cartons, les textiles, les plastiques, ou la céramique), une signature spectrale spécifique pour beaucoup de molécules intéressantes qui souvent n'existe pas dans d'autres parties du spectre électromagnétique comme le proche ou moyen infrarouge, et enfin il n'est pas ionisant (1 THz = 4,1 meV, soit un million de fois plus faibles que les photons X).

Ces propriétés ouvrent des perspectives d'applications à de nombreux domaines, comme la médecine, la biologie et la pharmacie – les ondes terahertz n'altérant pas l'ADN, la sécurité intérieure pour contrôler ce que transporte une personne ou

le contenu de colis, ou encore au contrôle non destructif de produits manufacturés – par exemple pour détecter des défauts de forme, des contaminants, des délaminations.

Ces applications seront servies en mettant en œuvre de **l'imagerie**, basée sur le degré de transparence des matériaux ou la détermination de la composition chimique d'échantillons par **analyse spectrale**. Pour de nombreux cas, il apparaît même opportun de combiner les deux approches en vue de l'imagerie multispectrale ou hyperspectrale THz et ainsi pouvoir localiser et identifier la nature chimique des éléments dans une image.

Le développement applicatif des techniques de détection THz est conditionné par l'émergence de technologies performantes associant coût et encombrement réduits. De tels composants commencent à être disponibles commercialement, et en particulier des caméras matricielles¹ THz non refroidies que cet article décrit.

¹ Des « caméras 1D » sont aussi également commercialement disponibles comme la TWAVE 1D de TRaycer. Il est également à noter que la compagnie japonaise NEC a décidé de stopper sa filière de caméras THz à base de bolomètres après plusieurs années de production.



Figure 1. Exemples d'images THz (réalisées avec les capteurs CEA-Leti). (a) Feuille en transmission. (b) Image visible d'objets cachés sur un buste. (c) Image THz brute des objets cachés sous une chemise.

Imagerie active et imagerie passive

Deux modalités d'imagerie THz coexistent. L'imagerie passive exploite le rayonnement thermique émis par un objet à température non nulle tandis qu'en imagerie active, une source THz externe éclaire la scène. Les très faibles puissances rayonnées thermiquement dans la gamme THz imposent l'utilisation de capteurs avec des sensibilités très élevées – typiquement des *noise equivalent power* (NEP) de l'ordre de quelques fW/\sqrt{Hz} – que seuls des détecteurs cryogéniques ou hétérodynes peuvent atteindre. Le coût de fabrication et d'opération, ainsi que l'encombrement de ces systèmes les réservent à des applications comme la défense, le spatial ou la sécurité.

Les caméras THz non refroidies peuvent remédier à ces freins 'marché' mais requièrent en contrepartie l'utilisation de sources d'illumination externe. En correspondance à un essor de sources commerciales, une dizaine de caméras non refroidies sont actuellement disponibles commercialement (cf. tableau en fin d'article).



Figure 2. Caméra TZCAM de I2S intégrant la technologie de capteurs matriciels bolométriques du CEA-Leti et une optique f/0,8.

Principales technologies de caméras non refroidies

Deux principaux phénomènes de transduction sont mis en œuvre dans les caméras existantes.

(1) Les **détecteurs thermiques** convertissent le rayonnement optique en un échauffement au niveau de chaque pixel. Le changement local de température se traduit alors par une variation d'une propriété physique

du pixel, sa résistance électrique (bolomètre résistif), ou sa charge de surface-capacité (pyroélectrique).

Les capteurs bolométriques de la caméra d'INO présentent une architecture de micro-pont très proche de celle des capteurs IR standard ; l'absorption dans la gamme THz est optimisée en modifiant l'impédance équivalente de l'absorbeur, soit au moyen d'un revêtement d'or noir extrêmement poreux, soit en ajoutant des surfaces sélectives en fréquences (« FSS ») sur la membrane.

Les bolomètres développés au LETI (intégrés dans la caméra TZCAM d'I2S) sont en rupture par rapport aux bolomètres standard en séparant la fonction de collection optique et de thermométrie. Ces deux phénomènes peuvent donc être optimisés indépendamment. L'absorption optique est assurée par des antennes situées sous et sur le micro-pont en association avec une cavité résonante réalisée entre le plan des antennes et le circuit de lecture CMOS. L'échauffement des charges des antennes parcourues par les courants de surface est ensuite

Les premiers du genre



La turbine à vapeur moderne a été inventée en 1884 par Sir Charles Parsons, dont le premier modèle fut connecté à une dynamo ayant générée 7,5 kW (10hp) d'électricité

Question :

Quelle est la turbine à vapeur la plus puissante à ce jour?

Arabelle est une turbine pour centrale nucléaire délivrant jusqu'à 1,9GW de puissance

Conçue pour la mesure Utilisée pour sa précision

Que vous utilisiez des sources THz ou des lasers de l'UV à l'IR, la Pyrocam 4 mesure les caractéristiques de vos faisceaux en temps réel.



- Faisceaux jusqu'à 25X25mm sans réduction
- λ de 13nm à 3mm
- Détecteur 320X320 pixels - 80 μ m chacun
- Logiciel d'analyse BeamGage inclus

Appelez-nous au Tél. +33 1 60 91 68 23



The True Measure of Laser Performance™

www.ophiropt.com/photronics



converti par une membrane thermo-résistive placée sur le micro-pont.

La caméra Pyrocam d'Ophir intègre une matrice de 160×160 pixels pyroélectriques LiTaO₃ hybridée par bille d'indium à un circuit de lecture de multiplexage. Cette caméra comporte également un chopper mécanique nécessaire pour ce type de capteur thermique sensible aux variations de courant.

Une alternative de caméra THz thermique (OpenView de Nethis) consiste à d'abord utiliser une membrane de conversion des photons THz en

chaleur et d'ensuite imager l'émission infrarouge (IR) de cette membrane au moyen d'une caméra IR commerciale.

(2) Les détecteurs à base de rectification électro-optique dans le canal d'un **transistor à effet de champ** (FET). Afin d'optimiser le couplage optique du rayonnement THz, des antennes sont connectées à deux ports du FET (par ex. grille et source) et une lentille hémisphérique tronquée est rapportée au-dessus du plan des antennes.

Principales caractéristiques communes de ces caméras

Ces détecteurs étant quadratiques, ils ne délivrent qu'une information d'amplitude du signal THz².

À l'exception des caméras OpenView, Pyrocam III et de Terasense, toutes ces caméras sont basées sur une détection directe par un capteur monolithiques

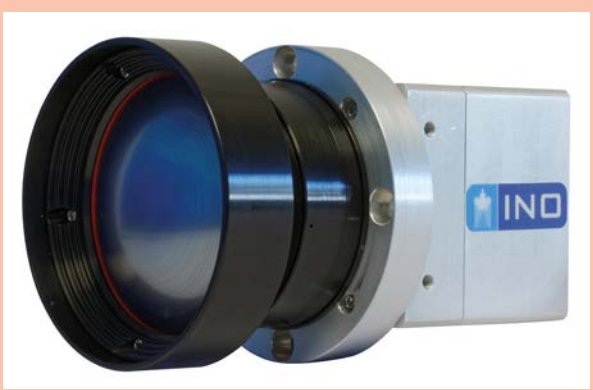
² Des détecteurs THz cohérents existent mais à ce jour pas sous le format de matrice intégrée dans une caméra commerciale.

MARQUE	PRODUITS	INFOS	CONTACTS
i2S Vision	Caméra TZCAM avec une optique f/0,8 20mm, et intégrant un capteur matriciel de 320×240 micromètres (pitch 50 µm, 25 Hz, technologie CEA-Leti)	http://www.i2s.fr/project/camera-terahertz-tzcam/	Alexandre Besson Tél. : 06 71 22 14 53 a.besson@i2s.fr
INO	Caméra MICROXCAM-384I-THZ avec 2 optiques possibles (44 mm f#0,7 & f#0,95) et un capteur bolométrique 384×288-pixels (pitch 35 µm, 50 Hz)	http://www.ino.ca/en/products/terahertz-camera-microx-cam-384i-thz/	Pierre Talbot Tél. : 418.657.7006 pierre.talbot@ino.ca
Nethis	Caméra Openview à base d'une membrane de conversion THz-IR associées à une caméra IR commerciale (256×320 pitch 170 µm / 512×640 pitch 80 µm)	http://nethis-thz.com/index.php/openview/	Jean-Pascal Caumes Tél. : 06 47 16 93 22 / 05 47 74 62 10 jean-pascal.caumes@nethis-thz.com
TeraSense	Caméra Tera à base de FET IMPATT en GaAs (3 modèles 16×16 / 32×32 / 64×64, pitch = 1,5 mm)	http://terasense.com/products/sub-thz-imaging-cameras/	Tél. : +1 (408) 600-14-59 info@terasense.com
Tic-Wave	Caméra TicMOS-1px à base de FET CMOS (jusque 500 fps, 100×100 pixels)	http://ticwave.com/products.html	contact@ticwave.com
Newport/Ophir	Caméra Pyrocam IV à base d'un capteur 320×240 pyroélectrique (pitch = 80 µm)	http://www.ophiropt.com	Nicolas Chaise, OPHIR Spiricon Tél. : 01 60 91 68 23 / 06 01 01 27 32 nicolas.chaise@eu.ophiropt.com Ariane Billard, Newport Corporation Tél. : 01 60 91 68 68 ariane.billard@newport.com



" ENSEMBLE TRAVERSONS LA MATIÈRE "

Figure 3. Caméra MICROXCAM-384I-THZ de INO intégrant un capteur matriciel bolométrique et équipée de son optique.



intégrant à la fois la matrice de pixels et le circuit CMOS ASIC³; ce dernier assure les fonctions de multiplexage, de filtrage, d'amplification et de mise en forme vidéo des signaux détectés par chacun des pixels.

Les détecteurs à base de FET de la caméra de Tic-Wave sont directement réalisés dans le CMOS silicium tandis que les matrices de bolomètres d'INO et I2S-LETI sont fabriquées collectivement sur le substrat CMOS selon des procédés standard de la microélectronique silicium. Cette spécificité permet d'obtenir des capteurs miniatures et des traitements électroniques en ASIC CMOS au plus proche des pixels. Elle ouvre aussi des perspectives majeures de réductions des coûts de production si le volume de caméras vendues venait à croître.

Il est enfin à noter que seules les deux caméras bolométriques citées sont équipées d'objectifs avec des ouvertures numériques entre 0,7 et 0,9 et des longueurs focales de quelques dizaines de millimètres.

Critères de choix d'une caméra térahertz

Quand un système d'imagerie est conçu, un premier dimensionnement du système doit permettre d'estimer le flux optique incident sur le plan image, la plage de fréquence d'opération, la

cadence d'acquisition maximale possible et l'étendue spatiale à imager.

En regard de cette analyse système, le premier critère à considérer pour le choix de la caméra est son seuil de détectivité dans la gamme spectrale de fonctionnement visée. C'est très souvent le jalon critique de faisabilité à franchir étant donnés les faibles niveaux de puissances optiques délivrées par les sources THz commerciales (quelques centaines de mW maximum en mode continu avec les lasers à gaz ou à cascade quantique) et les fortes atténuations du faisceau subies par le faisceau lors de sa propagation à travers l'atmosphère et les différents obstacles et dioptries optiques.

Pour pouvoir comparer les caméras, ce seuil de sensibilité par pixel doit être calculé à partir de la mesure des signaux délivrés par la caméra matricielle opérée en mode vidéo. Il faut reconnaître que c'est un paramètre souvent pas ou mal renseigné⁴. En particulier, rares sont les courbes d'absorption spectrale données pour la gamme de fréquence affichée souvent comme étant très large.

Le critère de sensibilité peut être défini par la puissance minimale détectée par pixel (*minimum detected power*, MDP, exprimée en watt) à une fréquence image donnée. Le MDP est défini comme le rapport entre le bruit RMS mesuré en sortie de la caméra

MTMULTISPECTRAL
INFRARED
TERAHERTZ
IMAGING
SOLUTIONS

NeTHIS

Metrology Industrial vision

NeTHIS-THz.com

NeTHIS
info@nethis-thz.com

³ ASIC : *application-specific integrated circuit*

⁴ Il est par exemple souvent difficile de savoir si un des paramètres a été calculé plutôt que mesuré, si un moyennage est appliqué, le niveau de réponse à partir duquel on considère les pixels comme fonctionnels...

MICRONORA

SALON INTERNATIONAL DES MICROTECHNIQUES



Précision / Miniaturisation
Intégration de fonctions complexes



25 - 28 sept. 2018
Besançon - France

Aéronautique, Luxe
Médical, Automobile
Télécommunications,
Armement, Nucléaire...

Découpage fin, Micro-usinage, Outillage,
Découpage, Fabrication additive, Micro-
assemblage, Automatisation, Robotique,
Injection, Surmoulage, Métrologie, Mesure,
Contrôle, Microfabrication, Nanotechnologie,
Interconnexion, Packaging microélectronique,
Ingénierie, Traitements, Laser, Technologies
de production ...

micronora.com

CS 62125 - 25052 BESANÇON Cedex
Tél. +33 (0)3 81 52 17 35



EXPOSEZ

ACHETER | UNE CAMÉRA TÉRAHERTZ

(en Vrms) et la réponse moyenne des pixels (exprimée en V/W)⁵.

Les caméras bolométriques sont les plus sensibles avec des MDP de l'ordre de quelques dizaines de pW aux fréquences pic d'absorption (quelques THz) tandis que les MDP des caméras à base de FET avoisinent les dizaines de nW (9 nW mesurés à 0,9 THz par l'université de Wuppertal qui a développé la caméra Tic-Wave). La caméra à base de membrane de thermo-conversion de Nethis et la caméra Pyrocam III présentent un niveau de MDP autour d'une dizaine de μ W, affichant en contrepartie un spectre de réponse très étendu de l'IR aux THz.

La résolution spatiale et la durée totale d'acquisition sont ensuite souvent des spécifications majeures pour l'application visée. C'est aux capteurs les plus sensibles mais aussi au format et à la cadence image la plus rapide qu'il faudra donner la préférence. Ce sont les caméras à base de microbolomètres qui présentent les formats les plus grands, typiquement quart de VGA, mais avec des pas pixels réduits (quelques dizaines de micromètres). Les caméras à base de FET sont de format plus faible mais avec des pas pixels plus grands et donc plus adaptés à la gamme spectrale autour de 100 GHz. Les cadences images des caméras commerciales sont toutes autour des fréquences vidéo usuelles.

Enfin le coût est évidemment un facteur décisionnel à considérer, en intégrant celui de la source THz à associer et les dispositifs opto-mécaniques potentiellement nécessaires. Mais en regard des bilans radiométriques souvent très critiques ce critère de sélection est de second rang par rapport à ceux décrits précédemment. Reste à trouver la « Killer application » pour que cette offre de caméra décolle et voit s'opérer une démocratisation des prix que les approches technologiques mises en œuvre doivent permettre d'assurer.

⁵ Quatre organismes développant ces caméras, NEC (N. Oda & al., J Infrared Milli Terahz Waves 2014), Tic-Wave (H. Sherry, ISSCC 2012), INO (M. Bolduc et al., SPIE 2011) et le LETI (F. Simoens et al., Phil. Trans. R. Soc. A 2014) ont caractérisé les sensibilités de leurs capteurs matriciels selon ce paramètre qui permet de les comparer avec un minimum d'hypothèses et d'incertitudes.

ERRATUM : Piezo stage



Micronix USA is now able to offer closed loop miniature piezo stages and a matched controller at the low price of typical low cost open loop stepper systems. Starting at 20 mm x 18 mm x 10 mm (l x w x h), the new low cost

PP-18 offers cross-roller bearings to assure high stiffness and is driven by our patented multi-phase piezo motor resulting in high speed (> 2 mm/s) and high blocking force (> 1.5 N). A linear encoder with 40 nm resolution is standard on all PP-18 stage to assure repeatability.

www.symetrie.fr