



L'ÉLECTROMAGNÉTISME, 150-1 UNE SCIENCE EN PLEINE ACTION !

Développement de mélangeur à bolomètre à électrons chauds à supraconducteur sur membrane pour la détection hétérodyne dans le domaine THz

Development of membrane based superconducting hot electron bolometer mixers for THz heterodyne detection

G. Gay*, Y. Delorme*, R. Lefèvre*, A. Féret*, T. Vacelet*, F. Dauplay*, J-M. Krieg*, L. Pagani*

*LERMA - Laboratoire d'Etude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique, Observatoire de Paris, 61 avenue de l'Observatoire 75014 Paris

Mots-clefs : Bolomètre à électrons chauds, supraconducteur, hétérodyne, térahertz
Key words: Hot Electron Bolometer, superconductor, heterodyne, terahertz

Résumé

Dans le cadre d'un programme de recherche soutenue par le CNES et d'un programme européen "Radionet FP7", nous avons développé un mélangeur à Bolomètre à Electrons Chauds (HEB pour "Hot Electron Bolometer") à supraconducteur sur membrane fonctionnant à 0.6 THz. Le mélangeur est en configuration quasi-optique, l'élément focalisant étant un miroir couplé à une antenne planaire sur la membrane contrairement à la solution couramment employée qui utilisent une lentille diélectrique sur laquelle est déposée l'antenne. Nous avons développé avec succès le procédé de fabrication des HEB au nitrure de niobium (NbN) sur une membrane au nitrure de silicium (Si₃N₄) de 1,4 μm d'épaisseur. La conception du mélangeur a été réalisée à l'aide du logiciel électromagnétique 3D Microwave Studio – CST. Le mélangeur réalisé a été caractérisé en hétérodyne à 0.6 THz et des résultats très prometteurs ont été obtenus.

Introduction

Des applications telles que les observations astronomiques du milieu interstellaire dans le domaine THz nécessitent des récepteurs extrêmement sensibles à cause du très faible signal émis dans ce domaine spectral. Les mélangeurs à bolomètre à électrons chauds à supraconducteur sont actuellement les plus sensibles pour les fréquences au-delà de 1,4 THz [1]. Dans un système quasi-optique classique le signal d'entrée est focalisé sur le détecteur par l'intermédiaire d'une lentille en silicium puis une antenne planaire concentre le signal sur le HEB. L'inconvénient de ce type de structure quasi-optique est que la traversée de la lentille et du substrat en silicium, sur lequel repose le mélangeur HEB, va engendrer des pertes dans le diélectrique. C'est pour cette raison que nous explorons d'autres voies pour améliorer les performances des futurs mélangeurs HEB.

Dans ce papier nous présentons un concept de mélangeur supraconducteur à HEB sur une membrane extrêmement fine où le signal est focalisé par un micro-miroir. Nous verrons ensuite la conception des antennes planaires sur membrane puis le procédé de fabrication de ces composants. Enfin, nous présenterons notre première réalisation d'un bloc mélangeur avec un HEB sur membrane, ainsi que nos premières mesures.

1. Conception du mélangeur HEB sur membrane

La détection hétérodyne est une technique employée pour transposer un signal de très hautes fréquences à des fréquences plus basses et donc plus faciles à être traitées. Le principe est assez simple, si nous voulons observer le signal d'une source radiofréquence autour d'une certaine fréquence F_{RF} , nous allons envoyer sur le détecteur un deuxième signal monochromatique, appelé signal d'oscillateur local, d'une fréquence connue F_{OL} . Le détecteur est ici un élément non-linéaire qui va mélanger les deux signaux et émettre en sortie un signal de fréquence intermédiaire (F_{FI}),

qui est simplement la différence entre les fréquences des deux signaux d'entrée ($F_{FI} = |F_{RF} - F_{OL}|$). Dans notre cas, l'élément non-linéaire est un HEB sur une membrane diélectrique extrêmement fine qui est transparente pour le rayonnement observé. Les signaux RF et OL sont mis sur le même chemin optique par l'intermédiaire d'une lame semi-transparente, ce signal mixte est envoyé à l'intérieur du cryostat dans lequel se trouve le bloc mélangeur (le détecteur hétérodyne). Ce dernier est constitué d'une membrane contenant le HEB et son antenne positionné dans le plan focal du micro-miroir (*Figure 1*). Une deuxième membrane portant un court-circuit est placée derrière le composant à une distance de $\lambda_0/4$ (λ_0 étant la longueur d'onde du signal dans le vide) afin d'augmenter le gain de l'antenne [2]. Ce type de structure présente plusieurs avantages: **1)** la membrane diélectrique supportant le mélangeur HEB est suffisamment fine pour ne pas perturber le signal qui la traverse et l'utilisation d'un miroir à la place d'une lentille n'engendre pas de pertes [3]. **2)** Cette réduction des pertes dans le substrat occasionne une augmentation de la sensibilité de détection et une diminution de la puissance d'oscillateur local nécessaire. **3)** L'absence de diélectrique sous l'antenne planaire (la membrane est suffisamment fine pour ne pas être prise en compte à notre fréquence de travail) permet d'agrandir les dimensions de cette dernière, cela est particulièrement intéressant pour la fabrication de détecteurs à très hautes fréquences car la dimension de l'antenne est inversement proportionnelle à la fréquence.

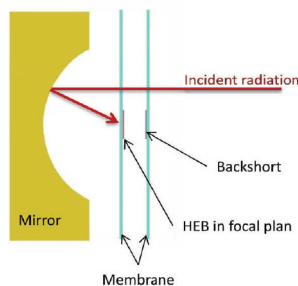


Figure 1. Schéma de principe du bloc mélangeur quasi-optique. Le signal d'entrée traverse la membrane puis est focalisé par un miroir sphérique sur l'antenne du HEB.

Un HEB est un micro-pont supraconducteur reliant les deux électrodes en métal d'une antenne planaire. Le matériau supraconducteur que nous utilisons est un film de nitrure de niobium (NbN) de 3.5 nm d'épaisseur. Le micro-pont HEB fait 2 μm de large et 200 nm de long. Le HEB est couplé à une antenne qui va guider les signaux RF et OL vers le HEB. L'énergie électromagnétique reçue par le micro-pont va être convertie en chaleur. En effet, les électrons du film supraconducteur vont emmagasiner cette énergie et s'échauffer jusqu'à créer une zone de "point chaud" au sein du film de NbN. La température va alors localement dépasser la température critique (température qui marque le passage de l'état normal à l'état supraconducteur) du NbN dans le micro-pont, ce qui va provoquer l'apparition d'une résistance électrique mesurable (*Figure 2*). Les antennes que nous utilisons sont soit de type log-spirale (large bande) [4], soit de type double fentes (beaucoup plus sélectives en fréquence). Dans les deux cas nous utilisons un logiciel de simulation électromagnétique 3D (CST Microwave Studio 2012 [5]) lors de la conception. Les simulations numériques nous permettent de définir au mieux les dimensions de l'antenne pour qu'elle résonne à la fréquence souhaitée. La *Figure 3* illustre la structure pour la modélisation numérique d'un HEB avec une antenne double fentes et un filtre RF. Les principaux paramètres simulés sont l'impédance et le diagramme de rayonnement de l'antenne. La *Figure 4* montre un exemple de simulation sur les paramètres S11 (coefficient de réflexion) et S12 (coefficient de transmission).

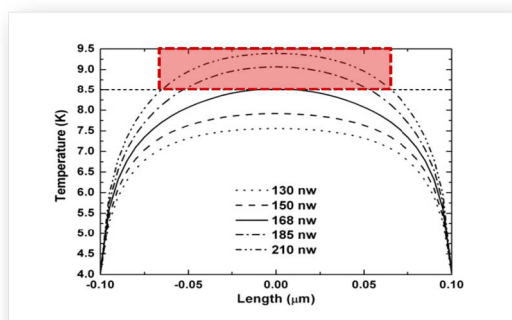


Figure 2 Simulation du profil de température des électrons le long du film de NbN. les différentes courbes représentent différentes puissances d'oscillateur local. La zone marquée en rouge symbolise le "point chaud" du HEB.

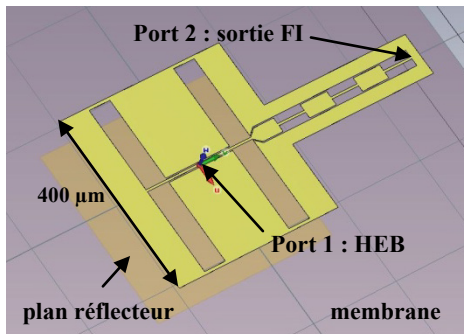


Figure 3 Modèle simulé d'une antenne double fentes sur membrane résonnant à 606 GHz. La longueur des fentes est d'environ 400 µm avec un plan réflecteur situé à $\lambda/4$ derrière l'antenne.

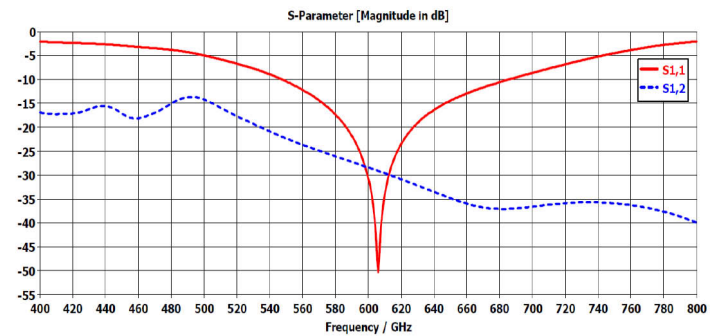


Figure 4 Exemple de simulation: paramètre S_{11} (rouge) représentant une résonance à 606 GHz et le paramètre S_{12} (en bleu pointillé) montrant la transmission du signal entre le HEB et la sortie fréquence intermédiaire.

2. Procédé de fabrication des HEB sur membrane

Nous utilisons un substrat de silicium de 400 µm d'épaisseur qui servira de support pour la membrane. Un dépôt d'une bi-couche de $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ de 1.4 µm d'épaisseur est effectué sur chacune des faces de ce substrat par un dépôt par vapeur chimique basse pression (LPCVD, pour "Low Pressure Chemical Vapor Desposition"). L'une de ces faces sera la membrane, l'autre face servira de masque lors de la gravure profonde du silicium. Sur la face avant (face du HEB), un film ultra-fîn de 3.5 nm d'épaisseur de NbN est déposé par pulvérisation cathodique, cette étape est effectuée en Russie par l'Université MSPU (Moscow State Pedagogical University). La structuration des HEB est réalisée par le LERMA dans la salle blanche du LPN (Laboratoire de Photonique et de Nanostructures) dont le détail est décrit dans [6]. Les électrodes et l'antenne sont réalisées en un seul dépôt d'Or afin de réduire au maximum le nombre d'interface entre les différentes couches (Figure 5). Les motifs sont définis par lithographie électronique. Ensuite, un masque de gravure est défini en face arrière, dans la bicouche de $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$, par une gravure ionique réactive. La membrane est obtenue par une gravure humide dans une solution de KOH (Hydroxyde de potassium) à 60°C. A cette température, il faudra environ 18h pour retirer les 400 µm de silicium sous l'antenne [7]. On obtient alors un HEB et son antenne sur une membrane transparente de 1.4 µm d'épaisseur et de 1.5 mm de côté (Figure 6).

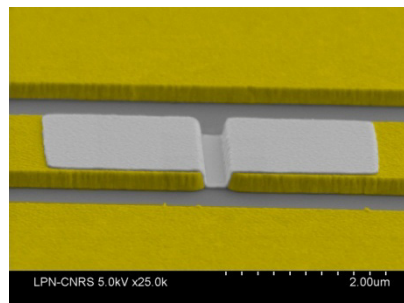


Figure 5. Image faite au MEB d'un pont HEB en cours de fabrication. En jaune, les électrodes et le plan de masse d'une antenne double fentes, la distance entre les électrodes détermine la longueur du pont HEB. En gris, le masque de nickel qui permet de définir la largeur du pont. Après une étape de gravure, le masque de nickel est retiré pour ne laisser que le micro-pont de NbN entre les électrodes.

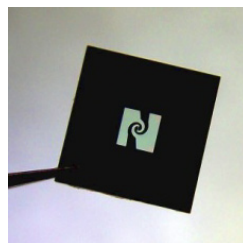


Figure 6. Vue depuis la face arrière d'un HEB et antenne log-spirale sur une membrane de 1.4 µm d'épaisseur.

3. Caractérisation du mélangeur réalisé

Un bloc mélangeur avec micro-miroir intégré a été réalisé en cuivre, afin d'assurer un très bon refroidissement du HEB dans le cryostat. Le silicium et le cuivre ont des coefficients de dilatation thermique très différents, or le cryostat est

refroidi à 4 K, le cuivre va donc beaucoup plus se contracter que le silicium, cette différence de comportement va générer des contraintes mécaniques sur la membrane pouvant aller jusqu'à sa destruction. Pour contourner cette difficulté, le substrat en silicium contenant la membrane est collé sur une plaque en céramique de nitrure d'aluminium (AlN) (Figure 8) dont le coefficient de dilatation est très proche de celui du silicium, il présente également l'avantage d'avoir une bonne conductivité thermique. Cette plaque est percée pour laisser passer le rayonnement vers le miroir. La plaque d'AlN est maintenue en position sur le micro-miroir par des griffes. L'alignement du HEB sur la focale du miroir est un point difficile à traiter. Il faut prendre en compte l'épaisseur du substrat de silicium, l'épaisseur de la plaque d'AlN et le rayon de courbure du miroir pour connaître précisément la profondeur d'usinage du miroir dans le cuivre. Cela implique la fabrication d'un nouveau miroir dès que l'on change un des éléments. Il faut également centrer le HEB dans le plan perpendiculaire à la propagation du signal, cette étape se fait avec l'aide d'un microscope. La très faible profondeur de champ des microscopes ne permet pas de voir en même temps le fond du miroir et le HEB ce qui rend le centrage particulièrement délicat. La sortie du signal de fréquence intermédiaire est assurée par une ligne micro-ruban sur Duroid à 50 Ω, le signal est ensuite envoyé par un câble coaxial vers un amplificateur cryogénique à 4 K avant de sortir du cryostat pour être analysé.

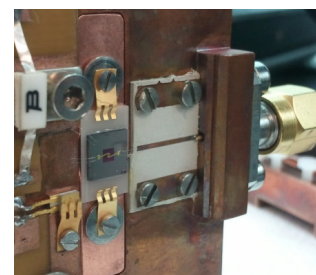
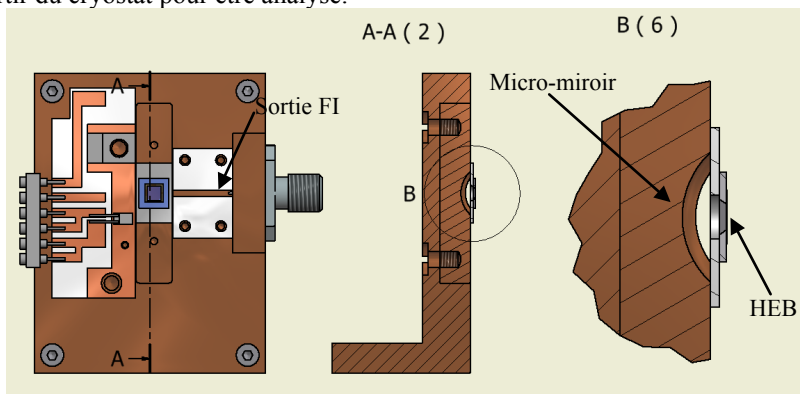


Figure 8. Photographie d'un montage d'une puce HEB avec une antenne log-spirale.

Figure 7. Conception du bloc mélangeur avec micro-miroir. A droite, vue en coupe du montage du HEB sur le micro-miroir.

Avec ce bloc mélangeur, nous avons testé différents designs d'antenne log-spirale avec des sources d'oscillateur local autour de 600 GHz, l'avantage de ce type d'antennes est qu'elles sont très large bande. La Figure 9 représente une caractéristique courant-tension d'un HEB. Sur la courbe rouge on voit le courant augmenter fortement sans que la tension n'augmente, le HEB est alors complètement supraconducteur. Ensuite, à partir d'un certain courant, que l'on appelle le courant critique "Ic" (ici de l'ordre de 65 μA), le courant diminue brusquement avec la montée de la tension. Dans cette zone le HEB est autour de sa température critique et peut devenir résistif. Enfin quand la tension continue à augmenter, le courant reprend une pente ascendante. Le rapport entre la tension et le courant tend alors vers la résistance de l'état "normal" du micro-pont de NbN. La courbe bleue représente le même HEB mais cette fois un signal d'oscillateur local à 618 GHz est envoyé sur le détecteur. La courbe est pratiquement une droite (qui tend vers la résistance "normale" du NbN) indiquant que le HEB est fortement pompé. Pour faire une mesure hétérodyne, c'est à dire, pour que le HEB mélange les signaux d'OL et RF et sorte un signal de fréquence intermédiaire (FI), il va falloir atténuer le signal d'OL pour se placer sur une zone intermédiaire entre ces deux extrêmes. C'est l'exemple de la courbe verte de la Figure 10 où il y a encore une non-linéarité visible entre 0 et 1 mV. La courbe violette représente la puissance de sortie du signal de fréquence intermédiaire : on voit que c'est juste au bord de cette zone que nous avons le maximum de puissance.

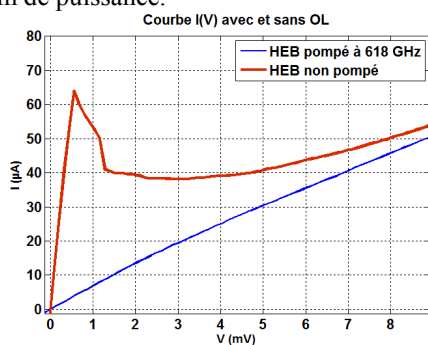


Figure 9. Caractéristique courant-tension d'un HEB sans OL (rouge) et en présence d'un OL (bleue).

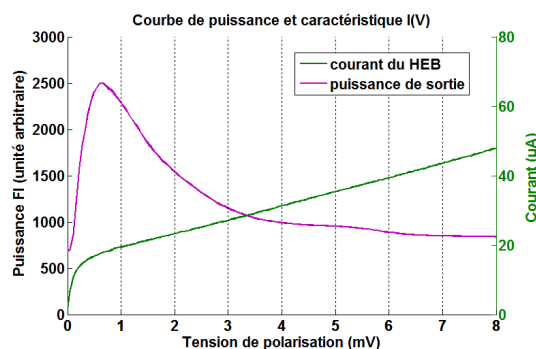


Figure 10. En vert, caractéristique courant-tension de l'HEB pompé à 618 GHz. En violet, courbe de puissance de sortie en FI (en unité arbitraire).

Comme indiqué plus haut, nous avons travaillé d'abord avec des antennes spirales, car leur large bande passante facilite les premières phases de mesures des prototypes. Nous avons effectué les premières mesures de température de bruit du mélangeur réalisé à des fréquences autour de 600 GHz qui se sont révélées encourageantes et prometteuses. Nous travaillons actuellement au développement d'antennes double fentes sur membrane qui devraient offrir un meilleur couplage du signal avec le HEB car ces antennes sont beaucoup plus sélectives en fréquence.

Conclusion

Nous avons présenté nos derniers développements de mélangeurs HEB sur membrane en structure quasi-optique. Nous avons développé le procédé de fabrication des HEB sur membrane et réalisé un mélangeur HEB utilisant un nouveau concept en quasi-optique. Les premières caractérisations en DC et en hétérodyne à 0,6 THz ont montré des résultats prometteurs. Nous continuons à explorer les possibilités pour améliorer les performances du détecteur, comme par exemple l'utilisation d'un miroir focalisant hors-axe ou encore l'utilisation d'une membrane de plus grande dimension afin de collecter d'avantage le signal d'entrée. Nous préparons également la montée en fréquence des détecteurs en concevant des antennes fonctionnant à 1,4 et 2,7 THz.

Remerciements

Ce travail est soutenu par le CNES et le programme européen "Radionet FP7". Nous remercions le LPN de nous offrir un accès privilégié aux moyens technologiques de sa salle blanche. Merci à la région Ile de France pour son soutien financier dans nos activités de recherche.

Références

- [1] P. Khosropanah, J.R. Gao, W.M. Laauwen, M. Hajenius and T.M. Klapwijk, "Low noise NbN hot electron bolometer mixer at 4.3 THz", *Applied Physics Letters*, Vol. 91, No. 22, pp. 221111, 2007
- [2] J. Baubert, P. Khosropanah, V. Desmaris, V. Drakinskiy, P. Pons, P. Calmon, H. Merkel, M. Salez, "FTS measurement of a 2.5 THz double slot antenna on SiO₂/Si₃N₄ membrane with a NbN HEB mixer", in *Proc. 16th Int. Symp. Space Terahertz Technology*, 2005, pp. 260–264.
- [3] D.F. Filipovic, S.S. Gearhart, G.M. Rebiez, "Double-slot antennas on extended hemispherical and elliptical dielectric lenses", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 41, No. 10, pp. 1738-1749, 1993.
- [4] J. D. Dyson, "The equiangular spiral antenna", *IRE Trans. Antennas Propag.*, AP-7, 181-187, (1959).
- [5] CST Microwave Studio, <http://www.cst.com>
- [6] R. Lefèvre, Y. Jin, A. Féret, T. Vacelet, W. Miao, L. Pelay, F. Dauplay, M. Ba-Trung, G. Gay, J.-C. Villégier, J. Spatazza, J.-M. Krieg, and Y. Delorme, "Terahertz NbN hot electron bolometer fabrication process with a reduced number of steps", In *Proc. 23rd Int. Symp. Space Terahertz Technology*, 2012, pp. 127-130
- [7] G. Gay, R. Lefèvre, Y. Delorme, F. Dauplay, A. Féret, T. Vacelet, L. Pelay, W. Miao, M. Ba-Trung, J.-M. Krieg, L. Pagani "Membrane-based quasi-optical superconducting HEB mixers at terahertz frequencies", *Proc. SPIE 8452, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VI*, 845213 (September 24, 2012).