

# Actions d'incitation

## *Incentive actions*

### **1. Exploration des potentialités des technologies et architectures MEMS pour le développement de nouvelles solutions de métrologie électrique**

*Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS) – Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) – Toulouse.*

Depuis 2007, et à la suite d'une étude prospective réalisée en 2006, le LNE/CMSI s'est lancé dans un projet de mise au point de références de tension très stables et de détecteurs de puissance hautes fréquences, fondés sur l'emploi de micro-systèmes électromécaniques (MEMS). L'objectif prioritaire de ce projet est la réalisation de références de tensions alternatives couvrant des valeurs de quelques volts à 200 V pour une plage de fréquence comprise entre 100 kHz et 100 MHz et présentant une stabilité meilleure que  $1 \mu\text{V/V/an}$ . Ces MEMS sont constitués d'une électrode mobile (au moyen d'un ressort) et d'une électrode fixe qui, sous l'effet d'une tension appliquée, accumule des charges qui génèrent l'apparition d'une force électrostatique engendrant le mouvement de l'autre électrode qui est également soumise à la force mécanique de rappel du ressort. La valeur maximale de la tension au-delà de laquelle les électrodes entrent inévitablement en contact constitue le phénomène de *pull-in* qui définit la référence de tension.

Ainsi, le LAAS est chargé de la conception et de la réalisation de dispositifs MEMS suivant différentes technologies et architectures car le choix de ces dernières conditionne les caractéristiques mécanique et électrique des composants et donc contribue à la stabilité de la tension de *pull-in*.

### **2. Fabrication d'une structure mécanique métrologique pour la réalisation d'un étalon calculable de capacité**

*Laboratoire de Métrologie et de Mathématiques Appliquées (L2MA) – ENSAM – Lille.*

La détermination directe du farad et de l'ohm est fondée sur la mise en œuvre d'un étalon calculable de capacité de Thompson-Lampard et d'un ensemble de ponts. Ainsi, pour atteindre l'incertitude relative cible de  $1 \cdot 10^{-8}$  sur la détermination de la constante de von Klitzing  $R_K$ , il est indispensable que l'incertitude introduite par chaque maillon de la chaîne de détermination directe soit maîtrisée et inférieure à cette valeur cible. Toutefois, le premier maillon de cette chaîne est l'étalon calculable de capacité de Thompson-Lampard qui dans sa configuration

horizontale, employée jusqu'en 2007 au LNE/CMSI, ne pouvait vraisemblablement pas être inférieure à  $5 \cdot 10^{-8}$ .

Il a donc été entrepris de réaliser un étalon calculable de capacité en position verticale pour d'atteindre cette incertitude de  $1 \cdot 10^{-8}$ .

L'objectif de cette étude, menée par le L2MA, est d'établir l'architecture mécanique générale de cet étalon dans le respect du cahier des charges défini par le LNE/CMSI.

### **3. Fabrication de réseaux d'échantillons à effet Hall quantique**

*Laboratoire de Photonique et de Nanostructures (LPN) – Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) – Marcoussis.*

La conservation de l'ohm est réalisée au moyen de dispositifs (barres de Hall) à effet Hall quantique placés à basse température et sous fort champ magnétique. En général, ces barres de Hall présentent des valeurs de résistances limitées à  $R_K/2$  et  $R_K/4$ , c'est pourquoi l'extension de la valeur nominale (entre  $100 \Omega$  et  $1 \text{ M}\Omega$ ) de tels dispositifs passe par la réalisation de réseaux de Hall (QHARS) constitués de barres de Hall mises en parallèle ou en série.

Ainsi, cette étude réalisée par le LPN vise à mettre au point un procédé de fabrication finalisé permettant de réaliser des réseaux de Hall impliquant, dans un premier temps, une dizaine de barres de Hall.

Cela nécessite tout d'abord la réalisation de gaz d'électrons bidimensionnels à partir d'hétérostructures de semi-conducteurs GaAs/AlGaAs, afin de produire des barres de Hall.

Ensuite, la couche isolante, employée dans la technique des multiples connexions électriques et servant à isoler les deux niveaux de connexions métalliques, sera réalisée. Cette couche doit d'une part ne pas modifier les caractéristiques des gaz d'électrons bidimensionnels, et d'autre part, présenter des propriétés spécifiques en terme de tenue mécanique, d'absence de trous et d'isolation électrique. Ainsi, pour répondre à ces exigences, plusieurs matériaux (nitrure de silicium, oxyde de silicium, polymère...) et techniques de dépôt (pulvérisation, PECVD...) seront envisagés.

Enfin, le procédé de fabrication de réseaux de Hall (conception et dessin des dispositifs, fabrication des masques, gravure du gaz d'électrons pour définir la forme du circuit, réalisations des contacts ohmiques et des connexions, gravure d'ouvertures entre les deux niveaux de connexions...) pourra être mis au point.

#### 4. Développement de nouveaux mécanismes de refroidissement d'atomes pour application aux horloges optiques

*Institut Non Linéaire de Nice (INLN) – Université de Nice Sophia-Antipolis et Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) – Valbonne.*

Les performances ultimes des fontaines atomiques ayant été atteintes (une exactitude relative proche de  $10^{-16}$  et une stabilité de fréquence de quelques  $10^{-14}$  à 1 s de mesure), les étalons de fréquence fonctionnant dans le domaine optique offrent des perspectives de performances accrues.

Aujourd'hui le LNE-SYRTE développe un étalon de fréquence optique utilisant des atomes froids de strontium. Les atomes sont refroidis sur la transition  $^1P_1-^1S_0$  à 461 nm et sont capturés dans un piège magnéto-optique, puis ils sont sélectionnés spatialement pour enfin être confinés dans un réseau optique formé par une onde stationnaire. Ils subissent ensuite un second refroidissement sur la transition  $^1S_0-^3P_1$  à 689 nm, avant d'être interrogés sur la transition d'horloge.

Cette étude, menée par l'INLN, vise à réaliser une nouvelle méthode de refroidissement d'atomes de strontium permettant de diminuer la durée de la phase de refroidissement des atomes. Elle consiste à exploiter au mieux la transition de refroidissement non fermée à 461 nm, ce qui conduirait à réduire, voire supprimer, la seconde phase de refroidissement sur la transition à 689 nm et ainsi augmenter le rapport cyclique de l'horloge.

#### 5. Expertise de la pyrorélectométrie bicolore en vue de son application en métrologie des températures

*Laboratoire des procédés, matériaux et énergie solaire (PROMES) – Centre national de la recherche scientifique (CNRS) – Odeillo.*

La détermination de la température de surface par voie optique nécessite la mesure simultanée et *in situ* de la température de luminance et de l'émissivité du matériau. La pyrorélectométrie multicolore constitue une voie prometteuse pour la mesure de la température de matériaux opaques et en l'absence de connaissance de l'émissivité du matériau. Mais cette méthode reste à être validée par une approche métrologique, tant sur le plan théorique qu'expérimental, pour s'assurer de la possibilité de son utilisation en métrologie des températures ou des propriétés radiatives.

Cette validation est donc l'objet de l'étude et doit permettre de valider la conservation du facteur de diffusion en fonction de la longueur d'onde, de vérifier l'unicité de ce facteur de diffusion et de déterminer les limites de la méthode.

PROMES dispose déjà d'un système de mesure de la BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) à 820 nm et a déjà proposé des méthodes de mesure de la température selon des techniques bi-chromatiques à 1 300 nm et 1 550 nm. L'effort portera sur le développement d'un instrument de mesure à 1,02  $\mu\text{m}$ , 1,3  $\mu\text{m}$  et 1,55  $\mu\text{m}$  et les mesures seront faites sur des

échantillons de tungstène, d'aluminium, de cuivre et de matériaux céramiques (chromite de lanthane, carbure de silicium).

#### 6. Méthode de caractérisation thermique de couches minces par radiométrie infrarouge à haute température

*Laboratoire Transferts Écoulements Fluides Énergétiques (TREFLE – UMR 8508 – ENSAM – Talence.*

Les caractéristiques thermiques d'un matériau en couche mince (dépôt sur un substrat) sont différentes de celles du même matériau considéré en volume et il n'est actuellement pas possible de prédire les caractéristiques thermiques du dépôt à partir des caractéristiques obtenues à l'échelle macroscopique. Il faut donc pouvoir réaliser des mesures directement sur la couche mince.

Depuis plusieurs années, TREFLE mène des travaux de recherche et de développement dans le domaine de la caractérisation thermique à l'échelle micrométrique. La présente étude s'inscrit donc dans ce contexte et repose sur des développements déjà utilisés pour la mesure de la conductivité thermique de dépôts en couches minces sur un substrat connu, à température ambiante. L'objet principal de l'étude est de développer un banc fondé sur le même principe mais fonctionnant à haute température.

Le principe de la mesure est d'exciter l'échantillon (côté dépôt) par une source laser continue dont l'énergie varie périodiquement dans le temps et d'enregistrer, à l'aide d'un détecteur infrarouge, le signal radiométrique (émis) issu de l'échantillon sur la même face. La source excitatrice est modulable en fréquence et le traitement du signal enregistré (module et phase) permet de calculer les propriétés thermiques de la couche mince.

Le banc actuel de TREFLE devra être totalement révisé dans sa conception pour pouvoir élever la température de l'échantillon jusqu'à 1 200 °C et pour adapter l'équipement de mesure à la mesure sur l'échantillon maintenu à cette température.

#### 7. Caractérisation et quantification de la contamination de surface des matériaux utilisés pour la réalisation d'étalons de référence de masse

*Science et Surface – Ecully et l'Institut des NanoSciences de Paris (INSP) – Université Pierre et Marie Curie.*

L'objet de l'étude est de définir et mettre en place des méthodes et techniques d'analyses spécifiques pour la caractérisation des couches superficielles dans le cadre du développement de nouveaux étalons de masse pour le projet de la balance du watt ou pour servir de référence de 1 g à 10 kg. Ces méthodes auront pour but de caractériser les couches superficielles des différents étalons résultant de différents procédés de fabrication : polissages, traitements thermiques, mise sous vide et procédures de nettoyage. La finalité de l'étude est d'apporter un outil permettant d'évaluer et de choisir le procédé de finition des étalons le mieux adapté afin d'assurer la meilleure stabilité en masse dans le temps et la meilleure reproductibilité de variation de masse lors du passage de l'air au vide.