

Électricité – Magnétisme

Electricity – Magnetism

1. Introduction

Les activités du domaine Électricité – Magnétisme sont partagées, au sein du LNE/DMSI, entre le département métrologie électrique fondamentale du pôle de recherche en métrologie avancée et les départements électricité basse fréquence et haute fréquence du pôle métrologie électrique. Outre, les nombreux résultats scientifiques obtenus, cette année 2008 a été marquée par la signature de l'ensemble des projets de recherche communs en métrologie (JRP) marquant ainsi le début officiel de la coopération entre différents instituts nationaux de métrologie européens.

2. Pôle de recherche

2.1. Conservation de l'ohm par effet Hall quantique et pont de comparaison de résistances

La collaboration avec le CEA-SPEC visant à réaliser une étude métrologique de l'effet Hall quantique dans le graphène a débuté. Ainsi, une technique de fabrication de barres de Hall fondées sur des monocouches et des bicouches de graphène de grande taille et de bonne mobilité électronique a été développée. Ces barres de Hall ont permis d'observer l'effet Hall quantique demi-entier comme le montre la figure 1.

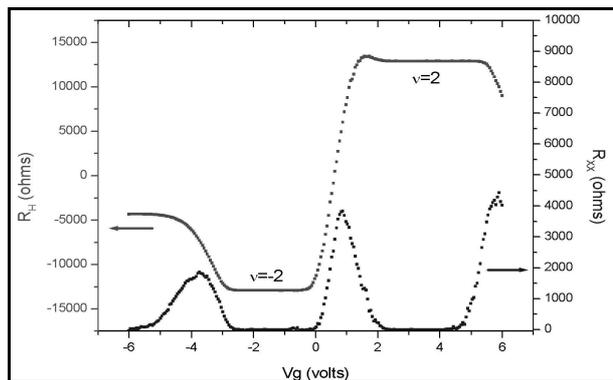


Fig. 1. – Résistance de Hall, R_H , et résistance longitudinale, R_{xx} , en fonction de la tension de grille, V_g , pour une induction magnétique de 11,7 T, un courant de mesure de 200 nA et une température de 1,3 K ; observation des plateaux de Hall $\nu = 2$ et $\nu = -2$.

L'action d'incitation dont l'objectif est de mettre au point un procédé de fabrication finalisé de QHARS a

permis tout d'abord de réaliser des barres de Hall dans un gaz d'électrons bidimensionnel réalisé dans une hétérostructure de semiconducteurs GaAs/AlGaAs avec une mobilité électronique de l'ordre de $10^6 \text{ cm} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ et une densité électronique de $3 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$. Ensuite, la couche isolante indispensable à l'isolation des deux niveaux de connexions nécessaires pour la réalisation de QHARS a été mise au point. Des QHARS simples ont alors été réalisés : deux réseaux sont mis en parallèle ; chacun des réseaux est constitué de deux barres de Hall placées en série.

De plus, le nouvel aimant supraconducteur permettant d'atteindre des champs magnétiques intenses (induction magnétique de 20,2 T à la température de 2,2 K) a été installé dans le réfrigérateur à hélium-3. Enfin, les sources de courant du pont de comparaison de résistances ont été réalisées.

2.2. Etalons de tensions continue et alternative à partir de l'effet Josephson

Un système modèle a été employé pour déterminer l'influence de différents paramètres (effets du câblage, des instruments de mesure...) sur la synthèse de tensions alternatives. Il repose d'une part sur le remplacement de la source de polarisation par un générateur de signaux arbitraires, et d'autre part, sur la polarisation d'un seul segment du réseau de jonctions Josephson programmables, ce qui conduit à générer des signaux carrés. Par ailleurs, une nouvelle canne cryogénique permettant de tester différents types de câblage (paires de fils torsadés et câbles coaxiaux) a été réalisée. De plus, un nouveau circuit de connexion a été mis en œuvre pour compenser les réflexions dues à la désadaptation d'impédance lors du branchement d'un instrument de mesure. Ainsi, les mesures réalisées dans ces conditions ont permis de démontrer que les tensions alternatives générées étaient influencées notamment par le câblage.

2.3. Etalon quantique de courant et expérience du triangle métrologique

Le réfrigérateur à dilution Cryoconcept (fig. 2) a été équipé (câblage, blindage du SQUID...) dans l'objectif de mesurer les prochains dispositifs mono-électroniques (pompes à électrons silicium, dispositifs développés dans le cadre du JRP REUNIAM...).



Fig. 2. – Réfrigérateur à dilution Cryoconcept.

2.4. Etalon calculable de capacité de Thompson-Lampard et ponts associés

L'étape de rodage des futures électrodes de l'étalon calculable de capacité de Thompson-Lampard a débuté avec comme objectif un défaut de cylindricité inférieur à 100 nm. Ainsi, des outils de rodage spécifiques ont été développés et permettent en plusieurs étapes d'atteindre le défaut de cylindricité recherché. Les figures 3 et 4 montrent les profils d'une électrode après les phases de rectification et de rodage.

Par ailleurs, la conception de l'étalon calculable de capacité de Thompson-Lampard en position verticale s'est poursuivie. Enfin, deux nouvelles résistances calculables de Haddad ont été réalisées afin d'étalonner les résistances de transfert de 10 k Ω , 20 k Ω et 40 k Ω du pont de quadrature. Ces résistances calculables de Haddad montrent des écarts proches de 10^{-9} entre les valeurs de résistance mesurées et celles calculées. Dès lors, les nouvelles résistances de transfert ont été caractérisées entre le continu et 1 600 Hz : elles présentent une faible variation en fréquence ($1 \cdot 10^{-7}$ kHz $^{-1}$ sur toute la plage de fréquence), une bonne stabilité ($3 \cdot 10^{-8}$ par jour une fois que la dérive liée à la décapsulation des résistances s'est stabilisée) et de faibles coefficients thermiques.

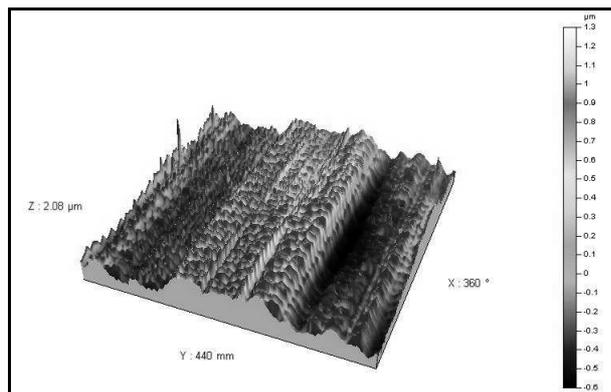


Fig. 3. – Profil d'une électrode après rectification.

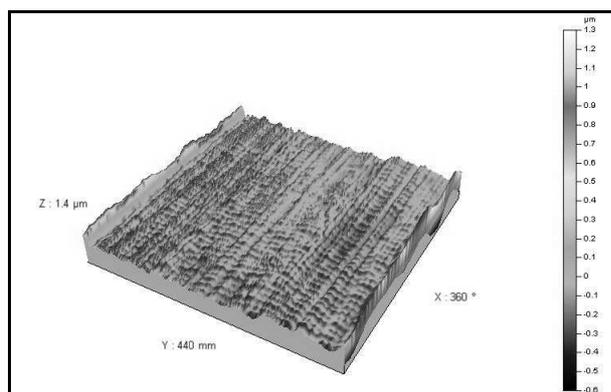


Fig. 4. – Profil de cette même électrode après rodage.

3. Métrologie électrique basse fréquence

3.1. Qualité de l'énergie électrique

En 2007, le LNE a mis en œuvre un wattmètre numérique à échantillonnage permettant de mesurer la puissance active à 53 Hz (pour des tensions maximales de 1 000 V et des courants pouvant atteindre 100 A) pour des signaux sinusoïdaux ou présentant un taux de distorsion harmonique inférieur à 0,1 %. Cette mesure est réalisée avec une incertitude, par rapport à la puissance apparente, de 10^{-5} W/VA. En 2008, le LNE vise à répondre à la problématique de la qualité de l'énergie électrique qui peut être altérée par des perturbations comme les fluctuations rapides de tension, les harmoniques... Ainsi, un étalon primaire de mesure des fluctuations rapides de tension (*flicker*) a été développé. Il permet de mesurer les fluctuations de tension $\Delta U/U$ avec une incertitude proche de $1 \cdot 10^{-5}$. Par ailleurs, le wattmètre numérique à échantillonnage a été adapté pour permettre la mesure du taux de distorsion harmonique en tension en prenant en compte la dépendance en fréquence des éléments constituant le banc (rapport de division du diviseur inductif, limitation de bande passante des multimètres...). Enfin la traçabilité des mesures de tension en régime sinusoïdal pour des fréquences de 20 Hz à 400 Hz a été établie en comparant les résultats obtenus par la technique d'échantillonnage et par la transposition thermique. En effet, les deux méthodes sont en accord avec une incertitude de 2 μ V/V.

3.2. Impédance aux fréquences intermédiaires

Aujourd'hui, la traçabilité au SI des mesures électriques dans le domaine des fréquences intermédiaires (100 kHz - 100 MHz) n'est pas établie. Cette traçabilité requiert le développement d'étalons d'impédances dont la réponse fréquentielle est calculable sur l'ensemble de la plage de fréquence. Tout d'abord, le LNE a développé des résistances calculables coaxiales à couche mince d'Evanohm et de nichrome. Ensuite, le LNE a mis en œuvre la méthode Suzuki qui permet de connaître l'impédance quatre paires de bornes d'un quadripôle à partir de la connaissance de ses paramètres S mesurés au moyen d'un analyseur de réseau vectoriel. Cette méthode a permis dans un premier temps de mesurer l'impédance des capacités à air commerciales de 1 pF, 10 pF, 100 pF et 1 000 pF. Dans un second temps, ces mesures ont permis de déterminer un modèle électrique de ces capacités, qui a été ensuite validée en le comparant aux résultats bibliographiques. Enfin, elle a été employée pour mesurer l'impédance d'une résistance calculable à couche mince de 10 kΩ. Son modèle électrique sera validé en le comparant aux résultats obtenus par la modélisation numérique par éléments finis.

3.3. Chaîne de mesure pour les impulsions de courant et les courants transitoires

Les courants impulsionnels sont communément représentés par une forme d'onde de temps de montée 8 μs, de temps de descente 20 μs (au bout duquel l'amplitude de l'impulsion a atteint 50 % de sa valeur crête) et de valeur crête 100 kA. Une chaîne de mesure de ces impulsions constituée d'un générateur d'ondes de choc, de capteurs de courant et d'un enregistreur numérique a été réalisée. Différents capteurs de courant ont été sélectionnés (*shunt*, tore Pearson, bobine de Rogowski) pour leurs caractéristiques (bande passante, courant nominal...). Ensuite, les premières mesures ont permis d'observer des dispersions entre les réponses des capteurs.

3.4. Référence de tension à partir de MEMS

Plusieurs MEMS, encapsulés hermétiquement ou non, ont été réalisés sur la base des trois structures distinctes élaborées. Ces structures sont toutes constituées d'une membrane silicium circulaire suspendue à des ressorts, mais elles se distinguent par la dimension et le positionnement de ces derniers. Parallèlement, deux cartes électroniques de commande faible bruit dédiées à l'actionnement et au contrôle du MEMS par un courant alternatif ont été réalisées. Par ailleurs, les programmes de pilotage des bancs de mesure des caractéristiques $C(V)$ et $U(I)$ ont été optimisés. Ensuite, des caractérisations $C(V)$ ont été réalisées sur des MEMS produits par le LAAS. Le phénomène de *pull-in* a été observé sur l'une des structures pour une tension de 1,96 V (proche de celle fournie par le calcul théorique). Cette tension se révèle être indépendante de la fréquence du signal de mesure (fig. 5). Enfin, en employant ce MEMS, des mesures $U(I)$

ont montré qu'il était possible de déplacer la membrane mobile au-delà de la position du *pull-in* et que cette tension était constante sur une large plage de fréquence.

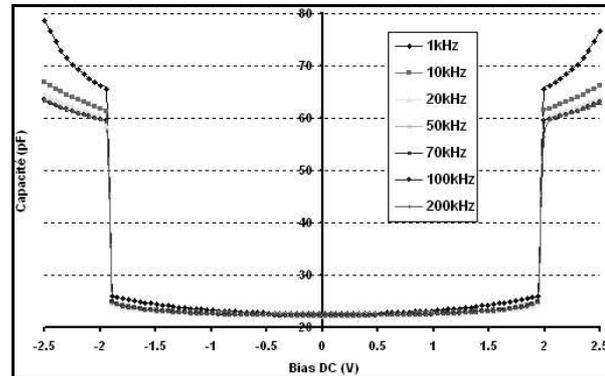


Fig. 5. – Observation de l'invariance du phénomène de *pull-in* (à 1,96 V de tension DC) avec la fréquence du signal alternatif de mesure.

3.5. Caractérisation et étalonnage de résistances en BF

Le pont à trois bornes a été mis en œuvre puis a permis d'étalonner, en phase et en quadrature, et avec une incertitude de 10^{-6} , le jeu de 69 résistances de valeurs supérieures à 500 Ω dans la gamme de fréquence comprise entre 20 Hz et 20 kHz. Par ailleurs, des étages différentiels ont été réalisés puis ajustés pour le pont à quatre bornes (dédié au raccordement des résistances de valeurs inférieures à 500 Ω), afin de limiter l'erreur de quadrature à une centaine de microradians.

4. Métrologie électrique haute fréquence

4.1. Raccordement des wattmètres sur ligne coaxiale 2,4 mm

Plusieurs lignes d'isolations thermiques à parois minces ont été réalisées pour finaliser le microcalorimètre. Elles sont constituées d'un conducteur extérieur en cuivre aminci collé à l'intérieur d'un cylindre support en Macor et d'un conducteur central en inox. Enfin, des sondes à thermocouple à chauffage indirect et direct ont été réalisées. Pour ces dernières, un système de régulation, permettant de maintenir constante la tension du thermocouple lorsque la puissance du signal radio-fréquence varie, a été réalisé.

4.2. Paramètres de dispersion S

Des améliorations ont été apportées au banc de mesures dimensionnelles afin de mieux positionner et aligner les différents capteurs le long des lignes coaxiales à caractériser. Par ailleurs, un programme a été mis en œuvre afin de calculer l'impédance caractéristique, la constante de propagation et la matrice S des lignes coaxiales, ainsi que les incertitudes associées, à partir des mesures dimensionnelles et de celles d'affaiblissement.

Deux générations de kits de calibrage en technologie planaire composés d'un ensemble d'étalons (lignes de transmission, atténuateurs, charges...) ont été réalisées sur substrat AsGa. Dans le cas d'un calibrage employant un atténuateur ou une charge adaptés à la place des différentes lignes de transmission nécessaires pour des applications larges bandes, une méthode de correction d'impédance de référence a été développée pour réduire les incertitudes.

4.3. Raccordement des mesures de DAS

Ce projet vise à étudier et à développer des moyens de mesure pour établir la traçabilité des mesures du DAS. Il répond à la directive européenne concernant les prescriptions minimales en matière de protection des travailleurs résultant d'une exposition aux champs électromagnétiques. Ainsi, des simulations ont été réalisées afin de trouver des solutions alternatives à la cellule en guide d'onde pour la mesure du DAS. Elles montrent qu'une structure à plaques parallèles en transmission incluant les transitions ligne coaxiale-plaques parallèles peut constituer un système large bande pour

l'étalonnage des sondes de mesure de DAS. Par ailleurs, des lignes de propagation coaxiales (fig. 6) de différentes longueurs ont été réalisées pour la mesure de la permittivité diélectrique complexe des liquides.

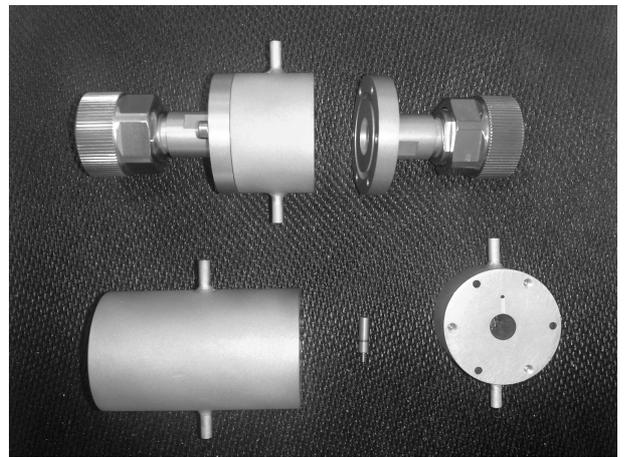


Fig. 6. – Lignes de propagation coaxiales pour la mesure de la permittivité diélectrique de liquide.