



Une loi d'échelle inattendue pour les électrons en dimension deux

Une équipe du Service de Physique de l'Etat Condensé, en collaboration avec l'Université de Nottingham, s'intéresse à la transition métal -isolant en dimension deux. S'agit-il d'une nouvelle phase quantique ou d'une transition de percolation ?

Que deviennent les lois physiques dans un espace à deux dimensions ? En matière condensée, cette question est loin d'être purement théorique, puisque la dimensionnalité joue un rôle crucial dans les propriétés des matériaux. Ainsi, les caractéristiques des métaux usuels à 3D (bonne conductivité électrique, etc...) tiennent à ce que les électrons peuvent se déplacer à peu près librement dans tout le volume. En deux dimensions, diverses expériences réalisées sur des gaz d'électrons à l'interface entre deux semi-conducteurs (Fig. 1) ont indiqué qu'au contraire le système était isolant. Ceci s'explique par le caractère désordonné des systèmes réels (défauts cristallins, impuretés). Ce désordre induit des termes d'interférences destructives dans les calculs de la fonction d'onde à un électron. Celle-ci a alors une extension finie dans le plan en raison des propriétés topologiques de l'espace à 2D, et chaque électron ne peut donc pas se déplacer dans tout le plan.

De manière surprenante, en 1994, S.V. Kravchenko et son équipe ont observé un comportement métallique dans des transistors à effet de champ (MOSFETs silicium) de très grande qualité. Ce comportement n'apparaît que dans un intervalle donné de la densité du gaz d'électrons 2D. Il se caractérise par une augmentation de la résistance avec la température. Cette découverte a déclenché une intense activité théorique et expérimentale dans le monde. Elle suggère

en effet une transition de phase quantique (en variant la densité) vers un nouvel état physique caractérisé par des corrélations entre électrons induites par leur interaction coulombienne répulsive. On sait que si la densité du gaz d'électrons est élevée comme dans les métaux usuels, cette interaction est négligeable : on a un liquide de quasi-particules indépendantes (le liquide de Fermi), leur interaction mutuelle étant écrantée par le système lui-même. Cet écrantage ne peut subsister à basse densité et le système doit s'ordonner

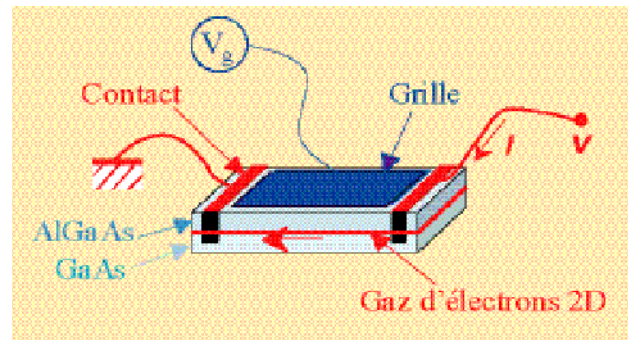


Figure 1 : Schéma de principe d'une hétérojonction GaAs/AlGaAs permettant d'obtenir un gaz d'électrons à deux dimensions. Celui-ci se forme à l'interface entre les couches de GaAs et d'AlGaAs. Sa résistance est mesurée grâce à des contacts métalliques diffusés à travers une des couches, qui permettent de le connecter électriquement. Une couche métallique (" grille ") à laquelle est appliquée une tension réglable (V_g) permet de faire varier la densité du gaz 2D.

dès que l'énergie cinétique due au confinement spatial des électrons devient faible devant l'énergie d'interaction coulombienne. Le système est alors très corrélé (cristal ou verre de Wigner). Le nouveau "métal" serait alors un état intermédiaire entre le liquide de Fermi et un système très "corrélé". Aujourd'hui

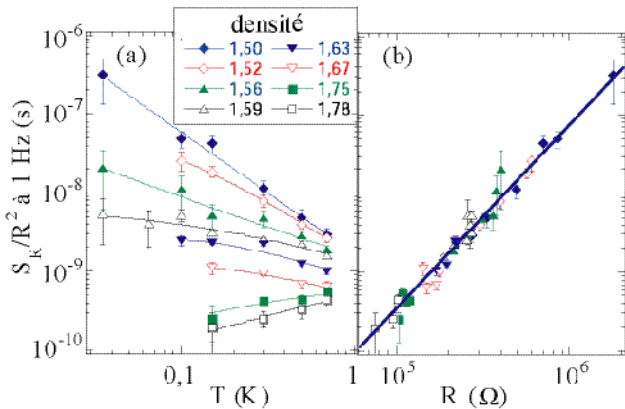


Figure 2 : Variance (S_R) relative des fluctuations de résistance (R) à 1 Hz, mesurée sur un système à deux dimensions réalisé à l'interface GaAs/AlGaAs. (a) : en fonction de la température, pour 8 densités (exprimées en 10^{10} cm^{-2}). (b) : en fonction de la résistance. La ligne bleue correspond à une loi de puissance d'exposant 2,4.

encore, malgré de nombreux efforts expérimentaux et théoriques, l'existence de cette nouvelle phase quantique reste controversée, et sa nature éventuelle est à préciser.

Pour analyser la physique du système, l'équipe du DRECAM/SPEM a mesuré une quantité bien connue en électronique : le " bruit en $1/f$ ". Il s'agit des fluctuations spontanées de résistance électrique, dont le spectre semble diverger vers les fréquences nulles. La mesure a été réalisée sur des gaz 2D électroniques réalisés à l'interface GaAs/AlGaAs d'échantillons de très grande pureté fabriqués à l'Université de Nottingham (Fig.1). Elle a nécessité l'utilisation de techniques particulièrement pointues de mesure de signaux de très faible niveau à des températures pouvant varier de 0,03 à 2 K. Pour cela, l'échantillon est placé dans un cryostat à dilution construit au laboratoire de cryogénie du SPEM. La Figure 2-a montre que l'amplitude moyenne relative des fluctuations de résistance dépend notablement de la température et de la densité. De façon remarquable, on observe que les fluctuations mesurées sont une simple fonction en loi de puissance de la résistance (Fig. 2-b) [2] : Ce comportement est typique de "l'invariance d'échelle" près d'une transition de phase dont on peut estimer la densité critique. Celle-ci serait inférieure à la densité pour laquelle est observée la transition de Kravchenko. Il y aurait donc bien une transition de phase, mais d'une nature différente de la transition métal-isolant.

Des calculs théoriques [2] suggèrent que cette transition est une transition de percolation. Cela permettrait de comprendre la valeur de l'exposant critique 2,4 (Fig.2-b), ainsi que le lien avec les transitions métal-

isolant en champ magnétique. Il y aurait une séparation spatiale entre deux phases haute et basse densité, la première " s'écoulant " à travers la seconde (Fig. 3). La nature de ces deux phases éventuelles reste cependant inconnue. Il pourrait s'agir du liquide de Fermi et du verre (ou du cristal) de Wigner. Dans ce cas, il n'y aurait pas de nouvelle phase quantique métallique. Affaire à suivre, donc ; mais après que les mesures de bruit l'aient éclairée d'un jour radicalement nouveau...

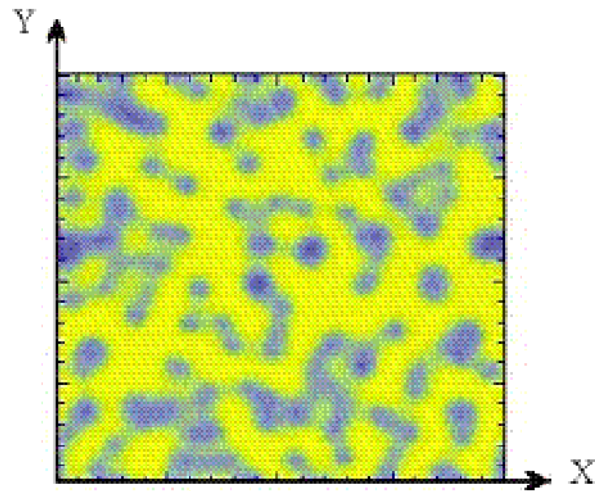


Figure 3 : Un exemple de distribution spatiale de densité, calculée pour le cas GaAs/AlGaAs, près de la transition métal-isolant (Shi et Xie, réf. 2). La densité varie d'un facteur environ 20 quand on passe des zones basse densité isolantes (en jaune) aux zones de haute densité conductrices (en bleu). Le côté du carré est d'environ 500 nm, et le nombre d'électrons qu'il contient est de l'ordre de 50.

Pour en savoir plus :

[1] R. Leturcq et al., Phys. Rev. Lett. 90, 076402 (2003) ; R. Leturcq, thèse à paraître dans " Annales de Physique " .

[2] J. Shi, X.C. Xie, Phys. Rev. Lett. 88, 086401 (2002).

Contacts :

Denis L'Hôte, 01 69 08 30 15
dlhote@cea.fr

Nanostructuration en phase liquide : l'application aux nanotransistors

Des chercheurs du Laboratoire des Solides Irradiés, en collaboration avec une équipe de recherche de l'Ecole Polytechnique ont mis au point un procédé de nanostructuration en phase liquide. Ce procédé prometteur est développé pour la fabrication de nanotransistors.

L'une des grandes difficultés technologiques pour l'intégration des composants électroniques à l'échelle nanométrique provient du fait que la moindre poussière qui vient se déposer sur le dispositif est de taille gigantesque par rapport aux structures actives du composant. De même, une petite contamination de l'atmosphère conduit au dépôt de quelques atomes étrangers sur la structure active et modifie complètement les propriétés physiques attendues. C'est la raison pour laquelle les lignes de production des composants sub-micrométriques actuelles sont placées en " salles blanches ", un milieu dont l'atmosphère est sévèrement contrôlée. A quantité égale de contaminant, il est plus difficile de contaminer un milieu liquide qu'un milieu gazeux car la densité du premier est beaucoup plus grande. Voici un argument fort pour développer un procédé de fabrication en phase liquide. Dans ce contexte, une voie originale de nanofabrication fonctionnant essentiellement en milieu liquide est à l'étude au LSI en collaboration avec le laboratoire de Physique des Interfaces et des Couches Minces (PICM) de l'Ecole Polytechnique. Le principe consiste à préparer un moule isolant électrique nanostructuré (de l'alumine en général). Ensuite, une croissance cristalline de matériaux actifs est induite dans les pores formés. Puis les contacts reliant les parties actives vers les réservoirs (générateurs électriques, capteurs magnétiques ou optiques, bain thermique...) sont réalisés par électrodéposition. Des nanotransistors avec leurs lignes de contact électriques ou thermiques ont ainsi été obtenus ce qui ouvre la voie à la fabrication de nanocomposants électroniques. Plus précisément, le moule est obtenu par anodisation de l'aluminium.

L'anodisation consiste à forcer l'oxydation de la surface de l'aluminium par l'application d'un potentiel électrique dans le bain (40 V). L'oxydation transforme l'aluminium en alumine et il se forme alors un réseau bidimensionnel de pores de diamètre nanométrique dans la couche d'aluminium. Le diamètre et la longueur des pores sont contrôlés. Le moule nanostructuré permet d'effectuer en phase liquide la croissance de divers matériaux tels que certains semi-conducteurs (Se, Te, Cu₂O), semi-métaux (Bi) ou supraconducteurs (Pb, Sn). Une électrodéposition ou une évaporation peut être effectuée sur les moules nanoporeux et l'anodisation peut être recommencée sous différents angles, avec des pores différents (ou pas de pore pour une couche diélectrique). Dans le cas d'un transistor, le procédé décrit dans un brevet récemment déposé permet de placer une tension de grille à quelques nanomètres d'un réseau de pores. Le squelette initial est un cylindre d'aluminium réduit chimiquement jusqu'à un rayon de quelques centaines de nanomètres.

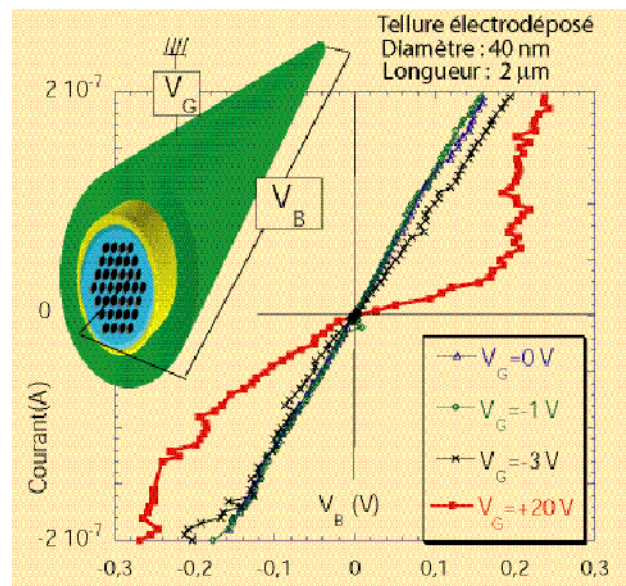


Figure 1 : Mesure courant-tension pour plusieurs valeurs de tension de grille (V_G) de nanofils de Te électrodéposés dans les pores longitudinaux de la membrane cylindrique. Le schéma indique la configuration du squelette d'alumine avec les couches d'isolant (jaune et bleue) et la grille métallique (verte) qui supporte la tension.

Une anodisation sans pores est réalisée perpendiculairement à l'axe du cylindre pour la partie isolante de la grille. Une anodisation longitudinale est ensuite menée pour obtenir un réseau de pores orientés selon l'axe du cylindre dans lesquels sera déposé le matériau actif (voir le schéma sur la Figure 1). Les caractéristiques d'un nanotransistor de tellure ainsi réalisés sont présentées en Figure 1. Le diamètre des fils est d'environ 50 nm. La grille est placée à une distance comprise entre 50 nm et 500 nm des fils (plusieurs nanofils sont contactés). Il apparaît que le moule obtenu en phase liquide remplit bien ses fonctions de squelette, autour duquel viennent s'organiser les différentes fonctionnalités du dispositif. Un effet de la grille a été mis en évidence qui paraît traduire un effet de champ. Le problème rencontré actuellement provient du manque de contrôle des propriétés des matériaux semi-conducteurs

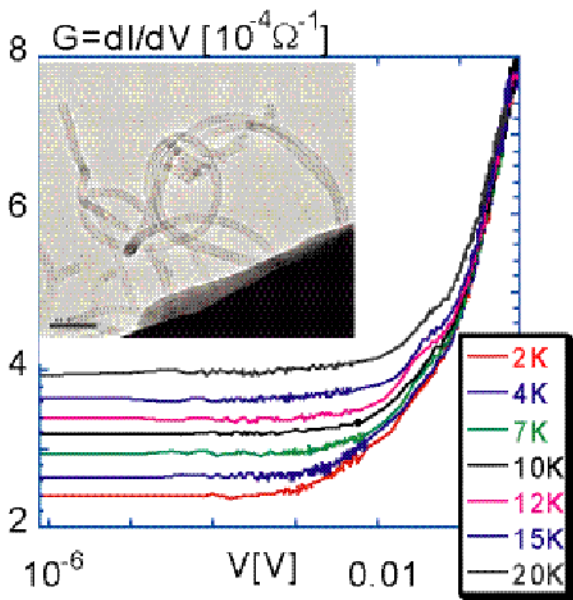


Figure 2 : Mesures conductivité-tension pour des nanotubes de carbone obtenus par CVD dans les pores de la membrane. Dans l'image du haut, les nanotubes de carbone (diamètre : 23 nm) sortent de la membrane d'alumine.

électrodéposés (en particulier de la structure **c r i s t a l l i n e**) . Ces difficultés liées à l'échelle nanométrique sont en passe d'être levées avec l'aide de techniques de croissance catalytique (CVD) et de ses dérivés. En effet, l'électrodéposition d'un catalyseur sur le moule permet la croissance du composant actif en phases mixtes (vapeur-liquide-solide). Ainsi, des nanotubes de carbone (fig. 2) et des nanobatonnets de silicium (fig. 3) ont été obtenus par croissance catalytique dans les pores. La topologie et la structure, généralement monocristalline, de ces objets les rendent idéalement adaptés à la réalisation de nanotransistors. Les résultats

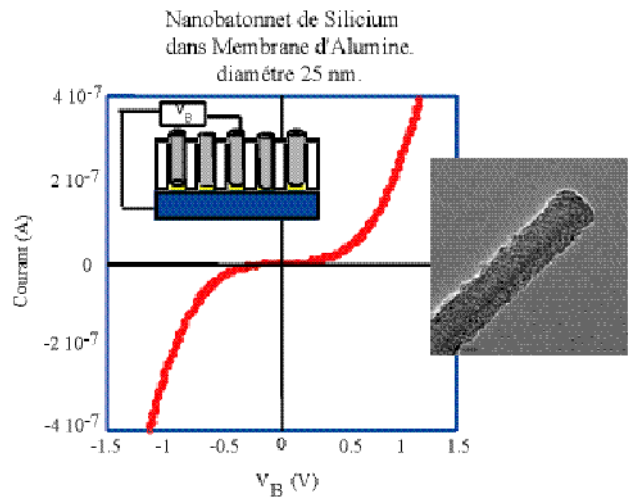


Figure 3 : Nanobatonnet de Si après dissolution de la membrane. A gauche, mesure courant-tension à 90K de part et d'autre de la membrane.

des premières mesures source-drain effectuées sans la présence de grille, sont présentés dans les Figures 2 et 3. La mise au point des dispositifs à grille est en cours. Du point de vue des applications industrielles, le procédé pour l'obtention de nanocomposants reste à systématiser.

Contacts :
 Wegrowe Jean-Eric (LSI/DRECAM)
 Jean-eric.wegrowe@polytechnique.fr

Phases magazine

La lettre du DRECAM et du SPHT

Directeur de la Publication : L. Laurent

Comité de Rédaction :

- R. Clocchiatti (LPS) - N. Betz (LSI) - P. Chenevier,
- H. Desvaux, (SCM) - F. Bourée-Vigneron, A. Menelle (LLB) - O. Golinelli (SPHT) - M. Poirier, F. Thais (SPAM) - D. Colson, G. Jasmin-Lebras (SPEC) - C. Barreateau, J. Charlier (SPCSI) - Y. N'Gono (CIRIL)

Réalisation : B. Pigeaud, C. Verneyre

Impression : Impact Graphic

ISSN N°1276-8650 Dépôt légal 4ème trimestre 1997.