

Le graphène épitaxié : un cas d'école de graphène isolé

Claire Berger et Amina Taleb-Ibrahimi

Résumé Le graphène épitaxié multicouches produit sur carbure de silicium, avec lequel sont réalisés des circuits électroniques à grande échelle, est une structure nouvelle de carbone. Des expériences menées sur la ligne de photoémission haute résolution Cassiopée à SOLEIL viennent de démontrer que de façon surprenante, les feuillets de graphène dans cet empilement rotationnel ordonné sont effectivement découplés et possèdent la structure électronique d'un feuillet isolé de graphène.

Mots-clés Graphène, carbone, propriétés électroniques, structure de bande, photoémission, rayonnement synchrotron.

Abstract Epitaxial grapheme: a model system for isolated graphene

Large scale transistor integration has been produced in multilayer epitaxial graphene grown on SiC. This material is a new structure of carbon, consisting of a rotationally ordered stacking of graphene layers. Experiments performed at the high resolution photoemission beam line Cassiopée at the SOLEIL synchrotron have demonstrated that very surprisingly these graphene layers are electronically decoupled and have the electronic structure of a single isolated layer graphene.

Keywords Graphene, carbon, electronic properties, band structure, photoemission, synchrotron radiation.

Une méthode simple et élégante pour produire du graphène vient d'être couronnée par le prix Nobel de physique 2010. Le graphène est un plan bidimensionnel d'atomes de carbone arrangés en un réseau en nid d'abeille. Le graphite, constitué de feuillets de graphène empilés, s'effeuille très facilement car les plans ont peu d'interaction entre eux. Une exfoliation répétée de graphite avec du scotch permet de rapporter sur une surface un feuillet de graphène unique.

Une méthode alternative pour produire des feuillets de graphène avait été développée dès 2001 au Georgia Institute of Technology à Atlanta, donnant lieu à une collaboration étroite avec le CNRS à Grenoble. Elle consiste à croître sur carbure de silicium (SiC) du graphène épitaxié de très grande qualité structurale qui recouvre continûment toute la surface de croissance, soit plusieurs centaines de cm^2 pour les substrats commerciaux de SiC. Pour cela, on chauffe sous atmosphère contrôlée une galette de SiC à environ 1 500 °C. Le cristal se décompose, le silicium sublime et les atomes de carbone en surface se réorganisent en un ou plusieurs feuillets de graphène.

Des procédés de lithographie conventionnels permettent de graver à grande échelle des composants électroniques à base de graphène dans les couches de graphène épitaxié. Un exemple d'intégration vient d'être démontré par la fabrication de 10 000 transistors de graphène interconnectés sur une puce de carbure de silicium de quelques mm^2 . Une gravure préalable du SiC définit des marches sur lesquelles le graphène croît préférentiellement. Des rubans continus de graphène sont définis par la hauteur des marches gravées, permettant de réaliser facilement des milliers de fils de 50 nm de large. La nouveauté réside dans la croissance directe des nanorubans, sans gravure du graphène, réduisant ainsi la rugosité des bords de rubans nuisible au transport [1].

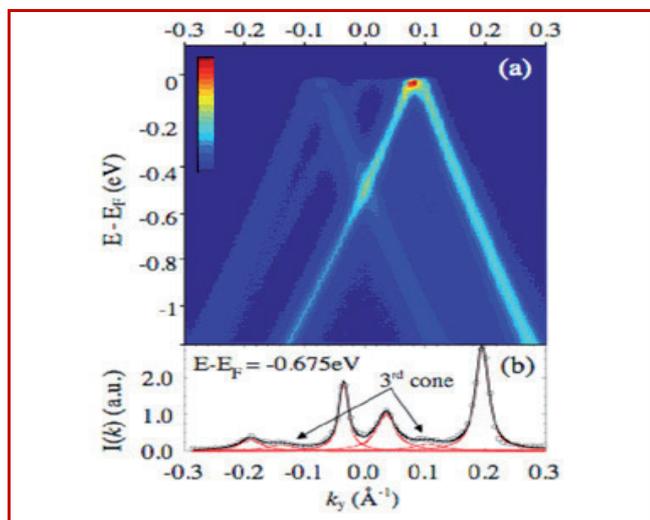
Mais le graphène épitaxié sur SiC n'est pas seulement la méthode choisie par l'industrie des semi-conducteurs à la

recherche de successeur au silicium pour des applications en électronique, notamment à haute fréquence. La grande qualité des couches de graphène épitaxié a permis des avancées déterminantes dans la connaissance de la physique du graphène, tout particulièrement par les études qui nécessitent des surfaces millimétriques. L'étude de la structure des niveaux électroniques sous champ magnétique [2] et leur interaction avec les phonons [3] a établi le record de mobilité électronique à température ambiante [4]. Les effets liés à l'empilement rotationnel des plans de graphène révèlent par ailleurs une physique très riche [5].

La collaboration internationale entre le CNRS (Grenoble), le Georgia Institute of Technology (Atlanta, États-Unis) et le synchrotron SOLEIL a entre autres permis la détermination de la structure électronique du graphène par photoémission [6]. Le travail dans le cadre de cette collaboration a démontré que le graphène épitaxié multicouches produit à partir de carbure de silicium est composé de feuillets de graphène découplés. La spectroscopie de photoémission résolue en angle (ARPES) obtenue sur la ligne de lumière CASSIOPÉE montre que la relation énergie/quantité de mouvement des bandes électroniques est linéaire (non quadratique) pour les multicouches, comme pour une couche de graphène unique conformément aux prédictions théoriques [7]. Ceci est dû à un empilement rotationnel unique entre les feuillets de graphène adjacents. Ce résultat prouve que ce matériau, bien que multicouche et en croissance épitaxiale sur un cristal, possède les propriétés électroniques d'un feuillet unique de graphène favorable au développement de l'électronique à base de carbone.

Dans une expérience de photoémission résolue en angle, un solide est irradié avec des photons d'énergie fixe. On mesure ensuite l'énergie cinétique et la direction (donc le vecteur d'onde) des électrons photoémis en dehors du solide. Des relations de conservation permettent alors facilement de déterminer l'énergie de liaison des électrons et leur vecteur d'onde dans le solide, donnant ainsi une image de la structure

de bande. Grâce à des détecteurs 2D, il est possible d'obtenir des cartographies de l'intensité des photoélectrons en fonction de leur énergie cinétique (ou de liaison) et leur direction d'émission (voir figure). Les résultats présentés dans cette figure sont la première évidence expérimentale directe de la linéarité de la structure électronique du graphène.



(a) Structure de bande d'un film de graphène épitaxié d'une dizaine de couches sur 6H-SiC face carbone, mesurée par ARPES (intensité photoémise en fonction de l'énergie des électrons rapportée au niveau de Fermi E_F et de la direction d'émission ou vecteur d'onde). La température de l'échantillon est de 6 K, l'énergie des photons incidents est de 36 eV et la résolution en énergie est meilleure que 10 meV. Deux cônes linéaires sont bien visibles. (b) Coupe à $E - E_F = -0,675$ eV, montrant un troisième cône entre les deux premiers. Les trois cônes qui sont visibles proviennent des trois premières couches découplées de l'échantillon de graphène mesuré.

Références

- [1] Sprinkle M., Ruan M., Wu X., Hu Y., Rubio-Roy M., Hankinson J., Berger C., de Heer W.A., Scalable templated growth of graphene nanoribbons on SiCM, *Nature Nanotechnology*, **2010**, 5, p. 727.
- [2] Miller D.L., Kubista K.D., Rutter G.M., Ruan M., de Heer W.A., First P.N., Strosio J.A., Observing the quantization of zero mass carriers in grapheme, *Science*, **2009**, 324, p. 924.
- [3] Faugeras C., Amado M., Kossacki P., Orlita M., Sprinkle M., Berger C., de Heer W.A., Potemski M., Tuning the electron-phonon coupling in multilayer grapheme with magnetic fields, *Phys. Rev. Lett.*, **2009**, 103, p. 186803.
- [4] Orlita M., Faugeras C., Plochocka P., Neugebauer P., Martinez G., Maude D.K., Barra A.-L., Sprinkle M., Berger C., de Heer W.A., Potemski M., Approaching the Dirac point in high mobility multilayer epitaxial grapheme, *Phys. Rev. Lett.*, **2008**, 101, p. 267601.
- [5] Darancet P., Wipf N., Mayou D., Berger C., de Heer W.A., Quenching of quantum hall effect and the role of undoped planes in epitaxial graphene, *Phys. Rev. Lett.*, **2008**, 101, p. 116806.
- [6] Sprinkle M., Siegel D., Hu Y., Hicks J., Soukiasian P., Tejada A., Taleb-Ibrahimi A., Le Fèvre P., Bertran F., Vizzini S., Enriquez H., Chiang S., Berger C., de Heer W.A., Lanzara A., Conrad E.H., First direct observation of a nearly ideal graphene band structure, *Phys. Rev. Lett.*, **2009**, 103, p. 226803.
- [7] Wallace P.R., The band theory of graphite, *Physical Review*, **1947**, 71(9), p. 622.



Claire Berger

est directrice de recherche CNRS à l'institut Néel¹ et au Georgia Institut².

(Photo : © www.phatpixelmedia.com)

Amina Taleb-Ibrahimi (auteur correspondant)



C. Berger

est directrice de recherche CNRS au synchrotron SOLEIL³.

¹ CNRS/Institut Néel, BP 166, F-38042 Grenoble Cedex.

Courriel : Claire.Berger@grenoble.cnrs.fr

² The Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia 30332-0430 (États-Unis).

³ UR1 - Synchrotron SOLEIL, L'Orme des Merisiers, Saint-Aubin, BP 48, F-91192 Gif-sur-Yvette Cedex.

Courriel : amina.taleb@synchrotron-soleil.fr



www.servier.fr

1^{er} laboratoire pharmaceutique français indépendant

- Plus de 20 000 collaborateurs
- Près de 3 000 chercheurs y préparent les médicaments du futur
- 25 % du chiffre d'affaires consacrés à la Recherche et au Développement
- 44 projets de molécules sont actuellement en Développement, en particulier dans les domaines suivants : les maladies cardiovasculaires, le système nerveux central et la psychiatrie, la cancérologie, le diabète et le métabolisme, la rhumatologie
- 45 nouveaux projets de Recherche couvrent également ces axes thérapeutiques
- Une présence sur les 5 continents, dans 140 pays
- 88 % des médicaments Servier sont consommés à l'International
- Un chiffre d'affaires pour 2010 de 3,7 milliards d'euros
- SERVIER contribue à la hauteur de 29 % à l'excédent de la balance commerciale française pour l'industrie pharmaceutique

SERVIER - 50, rue Carnot - 92284 Suresnes CEDEX, France - Tél. 01 55 72 60 00

11_HP_5066_JF_08-11