

Carbon nanotube electronics / Électronique à nanotubes de carbone

Foreword

Since their discovery by Iijima in 1991, carbon nanotubes (CNTs) have been the subject of an intensive research and development activity. Carbon nanotubes combine a very broad range of exceptional intrinsic properties, which are very interesting in many fields of science and technology. Especially in the field of electronics: (i) their electrical properties made them very promising building blocks for future nano-electronics; (ii) their 1D character and the surface-only nature of their carbon atoms make them highly charge-sensitive; (iii) their chemical properties allow advanced chemical functionalization; and (iv) their mechanical properties make them compatible with most substrates.

In a previous issue of the C. R. Physique (November 2003), a series of papers gave a broad description of these properties: growth and nucleation, mechanical and thermal properties, electronic structures and field emission, and some others.

Here, we propose a review on the most recent advances and results about their electronics and charge carrier transport properties, as well as on challenges for their use in the field of nano-electronics.

Their fundamental electronic properties are experimentally explored using cryogenic and high magnetic field experiments. *Ferrier et al.* discuss their superconductivity behavior when carbon nanotubes are connected to superconducting electrodes (the so-called proximity-induced superconductivity), opening the way to investigate superconductivity in a 1D limit. The recent advances in the understanding of the electronic band structure of individual carbon nanotubes are described by *Nanot et al.* on the basis of magneto-conductance experiments at high magnetic field (60 T). They describe how a magnetic-field combined with the electrostatic control of the charge carrier density in the nanotube (transistor configuration) allow modifying the band structure of carbon nanotube devices.

Advances in theory and simulation are described in three papers. Two of them highlight recent results to take into account effects not considered before. *Ishii et al.* focus on the impact of impurities and dynamical features such as the electron–phonon interactions. The correct description of these effects allows a good agreement with the experimental data, pushing theory towards a more efficient predictability. *Foa Torres* and *Cuniberti* also describe recent advances for understanding time-dependent (ac) transport properties, which are very relevant for a realistic understanding of the behavior of nano-electronic devices made of carbon nanotubes. To consider the use of carbon nanotube devices in electronic circuits, simulation tools, such as those routinely used in CMOS electronics, are mandatory to predict the device and circuit behaviors. However, the 1D character of the carbon nanotube requires more efforts on modeling to take into account their specific properties at the nanoscale. *Adessi et al.* review the most recent progresses for the development of a continuous approach from quantum calculations to compact device modeling (multi-scale simulations) that could be further used by electronic circuit designers.

Finally, technologically relevant problems and challenges for the development of useful devices are highlighted in two papers. *Pribat et al.* discuss the challenges we are facing for the organization of a large number of carbon nanotubes in a dense array, in order to obtain carbon nanotube transistors capable of delivering drive currents on a par with (or even higher than) those of their CMOS counterparts. They describe the recent developments of a technology based on the growth of the carbon nanotubes in a lateral (horizontal) porous alumina template. At the single nano-device level, many proofs of concept of high performance devices based on carbon nanotubes have been published. However, we are still facing serious challenges before to turn a Physics experiment into a viable technology. In their paper, *Derycke et al.* review these issues, focussing on the controlled synthesis, purification, chemical or physical separation (metallic versus semiconducting) of the carbon nanotubes, on the control of their positioning at a precise location on a wafer. They describe recent results on the chemistry and assembly of carbon nanotube and their appli-

cations to build high performance devices such as high-frequency transistors, opto-electronic switches and memories, and nano-electromechanical systems.

We hope that this brief (and obviously not complete) review will stimulate further works in this field.

Avant-propos

Depuis leur découverte par Iijima en 1991, les nanotubes de carbone (CNTs) ont fait l'objet d'une intense activité de recherche et développement. Les nanotubes de carbone combinent une très large gamme de propriétés intrinsèques exceptionnelles, qui sont très intéressantes dans de nombreux domaines des sciences et technologies. En particulier, dans le domaine de l'électronique : (i) leurs propriétés électriques sont très prometteuses pour de futures composants nano-électroniques ; (ii) leur caractère 1D et leur surface, composée seulement d'atomes de carbone, les rendent très sensibles aux charges électriques ; (iii) leurs propriétés chimiques permettent de leur conférer chimiquement des propriétés spécifiques (les fonctionnaliser) ; et (iv) les propriétés mécaniques les rendent compatibles avec la plupart des substrats.

Dans un numéro précédent des C. R. Physique (novembre 2003), une série d'articles donnait une description générale de ces propriétés : croissance et nucléation, propriétés mécaniques et thermiques, structures électroniques et émission de champ, entre autre.

Ici, nous proposons une revue des avancées et des résultats les plus récents concernant leurs propriétés électroniques et de transport des charges, ainsi que les challenges pour leurs applications dans le domaine de la nano-électronique.

Leurs propriétés électroniques fondamentales sont explorées expérimentalement par des techniques cryogéniques et en champ magnétique élevé. Ferrier et al. discutent du comportement supraconducteur quand les nanotubes de carbone sont reliés à des électrodes supraconductrices (ce qu'on appelle la supraconductivité induite par proximité), ouvrant la voie à des études de la supraconductivité dans une limite 1D. Les progrès récents dans la compréhension de la structure de bandes électroniques des nanotubes de carbone sont décrits par Nanot et al. sur la base d'expériences de magnéto-conductance à haut champ magnétique (60 T). Ils décrivent comment un champ magnétique combiné avec le contrôle électrostatique de la densité de charge dans le nanotube (configuration transistor) permet de modifier la structure de bandes des nanotubes de carbone.

Les progrès en théorie et en simulation sont décrits dans trois articles. Deux d'entre eux soulignent les derniers résultats tenant compte d'effets non considérés jusque alors. Ishii et al. se concentrent sur l'impact des impuretés et les phénomènes dynamiques tels que les interactions électron-phonon. La description de ces effets donne un bon accord avec les données expérimentales, et permet de progresser vers une théorie plus prédictive. Foa Torres et Cuniberti décrivent également les progrès récents pour la compréhension des propriétés de transport dépendantes du temps (ac), qui sont très utiles pour une compréhension réaliste du comportement de nano-dispositifs électroniques à base de nanotubes de carbone. Pour ce qui est d'envisager l'utilisation de ces nano-dispositifs dans des circuits électroniques, des outils de simulation, tels que ceux couramment utilisés en micro-électronique CMOS, sont nécessaires pour prédire le comportement des composants et circuits. Toutefois, la dimension 1D des nanotubes de carbone nécessite plus d'efforts pour le développement des modèles afin de tenir compte de leurs propriétés spécifiques à l'échelle nanométrique. Adessi et al. passent en revue les progrès les plus récents pour développer une approche continue, des calculs quantiques jusque aux modélisations compactes des dispositifs (simulation multi-échelle), qui pourront être utilisés ensuite par les concepteurs de circuits électroniques.

Enfin, les problèmes relatifs aux composants et la technologie sont mis en exergue dans deux articles. Pribat et al. débattent des challenges en cours concernant l'organisation d'un grand nombre de nanotubes de carbone en un réseau dense, afin d'obtenir des transistors à nanotubes de carbone capable de fournir des courants de sortie similaires à (ou même plus élevé que) ceux de leurs homologues CMOS. Ils décrivent l'évolution récente d'une technologie basée sur la croissance des nanotubes de carbone dans un moule latéral (horizontal) d'alumine poreuse. Au niveau du nano-composant isolé, de nombreuses preuves de concept de composants à hautes performances basés sur des nanotubes de carbone ont été publiés. Toutefois, nous sommes encore confrontés à de sérieux défis pour passer du stade d'une expérience de physique à celui d'une technologie viable. Dans leur article, Derycke et al. examinent ces questions, en mettant l'accent sur le contrôle de la synthèse, la purification, la séparation (métallique versus semi-

conducteurs) physique ou chimique des nanotubes de carbone, sur le contrôle de leur positionnement à un endroit précis dans un circuit. Ils décrivent les résultats récents sur la chimie et l'assemblage de nanotubes de carbone et leurs applications à la réalisation de composants performants tel que des transistors à haute fréquence, des commutateurs et des mémoires opto-électroniques, et des nano-systèmes électromécaniques.

Nous espérons que cette brève (et bien évidemment incomplète) revue stimulera de nouveaux travaux dans ce domaine.

Dominique Vuillaume
Institut d'électronique microélectronique et nanotechnologie,
CNRS & université de Lille,
avenue Poincaré,
59652 Villeneuve d'Ascq,
France
E-mail address: dominique.vuillaume@iemn.univ-lille1.fr