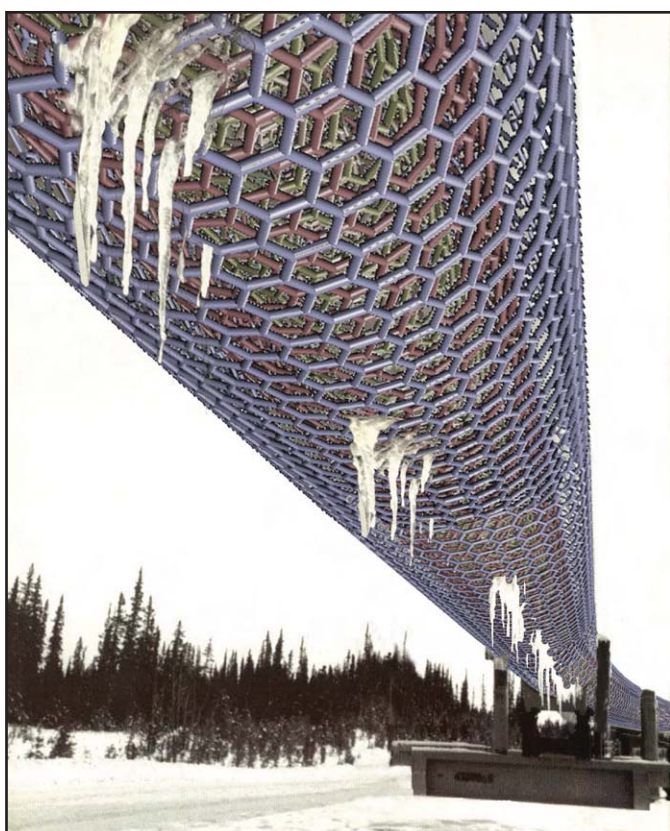


ОДНОСТЕННЫЕ НАНОТРУБКИ (ОСНТ) (Single Wall Nanotubes)

«Там, где наука встречается с искусством...»

Г. Гаузе



Представьте, как резко изменилась и какой странной стала бы наша жизнь, если бы исчезли все трубы – по ним вода попадает в краны и батареи наших домов, по ним транспортируют нефть и газ, без них сложно представить систему городской канализации. При постройке сборных зданий из металлоконструкций используют трубы вместо сплошных металлических прутков, т.к. известно, что у труб отношение прочности на изгиб к массе при одинаковом диаметре заметно выше... Все они такие разные и такие функциональные. А как Вы думаете, какого минимального диаметра может быть труба, чтобы оставаться полезной? В 1993 году ученые открыли самые

маленькие в мире одностенные **углеродные нанотрубки** диаметром от 1 нм. Поразительные свойства этих структур сделали их источником идей для сотен различных применений в науке и технике, в том числе в нанотехнологии и наноэлектронике, и вдохновили исследователей на поиск новых **неуглеродных нанотрубок** среди других классов неорганических соединений. Для этого был проведен ряд теоретических и экспериментальных работ, позволивших сначала предсказать, а затем и синтезировать одностенные нанотрубки изоэлектронных аналогов углерода – гексагональных BN , $\text{B}_x\text{C}_y\text{N}_x$, а также наноструктур, полученных замещением атомов углерода в ОСНТ на атомы азота и бора (BC_x , CN_x). Следует отметить, что трубки, полученные сверткой изоструктурных аналогов графита, таких, как нитрид бора BN , более технологичны, чем сами углеродные нанотрубки и имеют узкое распределение по размеру от 0,5 нм до 3 нм (рис. 1). Они обладают интересными электронными характеристиками, являясь полупроводниками с шириной запрещенной зоны 4,5–5,5 эВ, независимо от диаметра трубки и ее **хиральности**. Экспериментально доказано, что BN -нанотрубки крепче и легче стали, а полимерные матрицы, содержащие такие нанотрубки, могут использоваться для

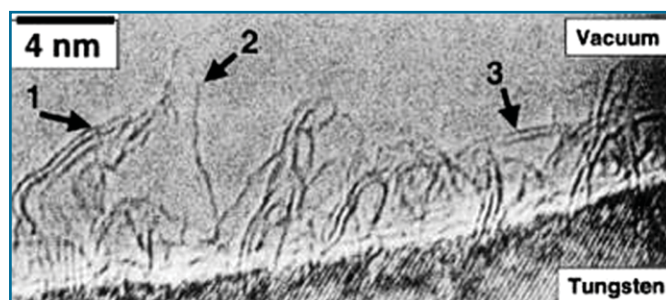


Рис. 1 Одностенные нанотрубки BN

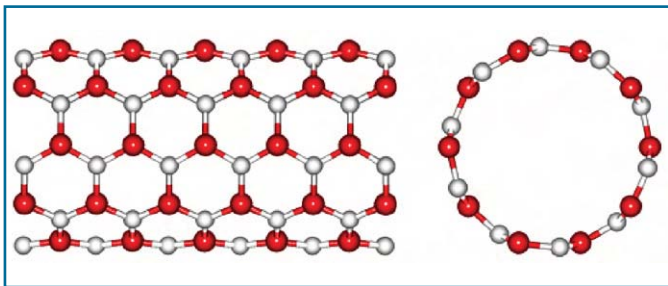


Рис. 2. Модель нанотрубки BeO (белые атомы — Be, красные — O)

упрочнения поверхности металлических изделий и для создания стойких к окислению покрытий.

Наиболее интересным представителем неорганических ОСНТ являются BC_2N -трубки, настолько близкие по своей структуре к углеродным нанотрубкам, что их можно получить частичным замещением атомов углерода в последних на атомы азота и бора. Благодаря сворачиванию карбонитрида бора в цилиндры по спирали в нанотрубках BC_2N возникают круговые токи, что позволяет рассматривать их как своеобразные наносоленоиды. Более того, в зависимости от диаметра и хиральности BC_2N нанотрубок происходит изменение металлического типа проводимости на полупроводниковый, открывая перспективы их использования в различных областях **нанозлектроники**.

Не так давно были открыты нанотрубки большой группы халькогенидов d-элементов MX_2 ($M = Ti, Zn, Nb, Bi, Mo, Cd, W, Ag, Ta$; $X = S, Se$) и выполнен теоретический прогноз нанотрубок новых составов SiC , TiO_2 , BeO (рис. 2).

Свойства углеродных и неуглеродных одностенных нанотрубок до конца еще не изучены, а исследователи уже придумали способ их расширить и значительно модифицировать. Для этого достаточно заполнить пустоту «цилиндра» каким-либо химическим соединением. В настоящий момент разработаны различные методики «вливания» простых и сложных соединений в виде раствора или расплава во внутренний канал трубок, например иодидов (рис. 3). Исследования показали, что в зависимости от параметров электронной и кристаллической структуры внедряемого соединения значительно изменяются электронные и механические свойства образующегося композита трубка–вещество. Во вну-

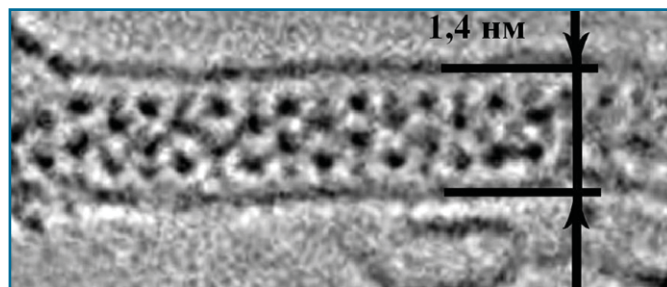


Рис. 3. Нанокристалл CuI в канале одностенной углеродной нанотрубки (синтезирован М.В. Чернышевой и А.А. Елисеевым, ФНМ МГУ), изображение получено Н.А. Киселевым (ИК РАН) и J.L. Hutchison (University of Oxford)



Рис. 4. «Стручок» — молекулы фуллеренов C_{60} в одностенной углеродной нанотрубке

тренный канал ОСНТ удалось поместить даже цепочку из молекул фуллеренов, получив так называемые «стручки» (pea pods) (рис. 4), причем при $1200\text{ }^\circ\text{C}$ «горошины» сростаются с образованием еще одной нанотрубки!

Совсем недавно исследователи научились создавать «стручки» с неорганическими «горошинами» из фуллерено-подобных молекул – металлокарбоэдренов состава M_8C_{12} ($M = Sc, Ti, V, Zr, Nb$). Изменяя химический состав «горошин», можно регулировать прочность связей, стабильность получаемых структур и их диэлектрические свойства. На сегодняшний день подобные «стручки» являются интереснейшим и перспективным материалом для микро- и нанозлектроники, который можно использовать для создания нанодiodов, **транзисторов**, элементов памяти и логических схем, а также аккумуляторов водорода и высокотемпературных сверхпроводников.

Как видите, несмотря на наноразмер, углеродные трубочки в полезности и перспективности для практического применения ничуть не уступают своим гигантским собратьям.

Литература:

1. Ивановский А.Л. Успехи химии. 2002. Т. 71, № 3. С. 203–224.
2. Chernysheva M.V., Eliseev A.A., Lukashin A.V. et al. Physica E. 2007. Vol. 37. P. 62–65.
3. Luzzi D.E., Smith B.W. Carbon. 2002. Vol. 38. P. 1751–1756.