

Лекция 1

«Если бы автомобилестроение развивалось со скоростью эволюции полупроводниковой промышленности, то сегодня роллс-ройс мог бы проехать полмиллиона миль на одном галлоне бензина, и дешевле было бы его выбросить, чем заплатить за парковку»

Гордон Мур, один из создателей фирмы «Интел»

Лидирующие технологии 21 века:

Нанотехнологии

Информационные технологии

Биотехнологии

В 1965 г. американский физик-электронщик Г. Мур обнаружил интересную закономерность в развитии микроэлектроники [1]. Она широко известна теперь как закон Мура и гласит: «Число транзисторов на кристалле микросхемы удваивается каждые два года», причем происходит это, в первую очередь, за счет уменьшения размеров транзисторов и других элементов микросхемы. Удивительно, но вплоть до настоящего времени (т.е. уже на протяжении 50 (!) лет) не наблюдается замедления этого темпа роста интеграции микросхем, и закон Мура остается справедливым. Это позволяет заглянуть в будущее и убедиться, что примерно на рубеже 2015—2020 гг. микроэлектроника должна достичь физического предела, когда отдельный элемент микросхемы будет состоять из нескольких атомов, а его размер окажется порядка 1 нанометра ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$, для сравнения: размер атома Si — его удвоенный ковалентный радиус — равен 0,24 нм). В этом случае осуществится переход от микроэлектроники к наноэлектронике.

В силу закона Мура, сейчас транзисторы имеют размер порядка 40 нанометров (нанометр — это 10^{-7} см). Это больше чем в 1000 раз тоньше человеческого волоса, и планируется переход на всё меньший и меньший размер. Вопрос в том, куда ведет

этот путь, имеет ли он конец. Что будет в ближайшее время? Ну, в ближайшее время планируется переход на 35 и нанометров. Возможен в будущем переход еще на 12,5 нанометров, но что дальше? Дело в том, что не будет ли толщина такой, что будет вся эта система пробиваться напряжением, будет перегреваться? Там возникает масса различных технических и фундаментальных вопросов.

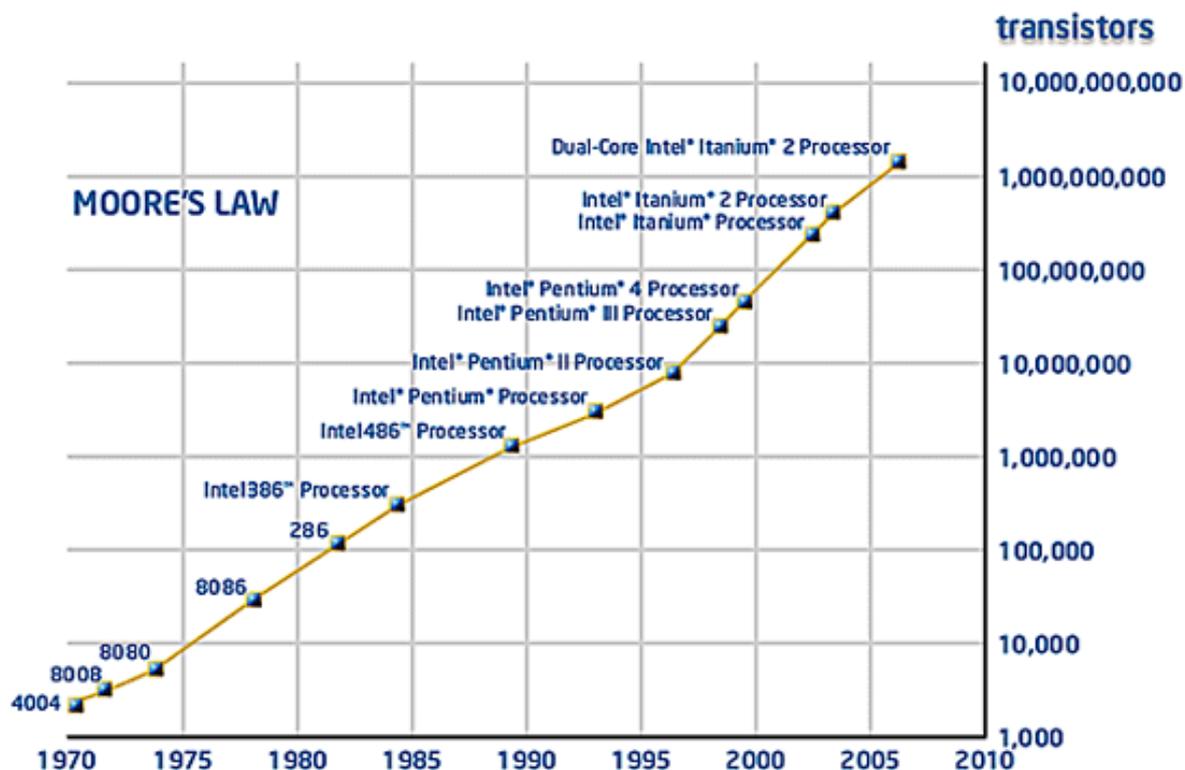


Рис. 1. Закон Мура

Чтобы этот переход действительно свершился, во всем мире ведутся широкомасштабные исследования, а физика и технология наносистем (т.е. атомных систем, имеющих размеры нанометрового масштаба) стали в наши дни наиболее приоритетными направлениями развития физики твердого тела и материаловедения. Так как существующие (традиционные) методы создания полупроводниковых микросхем не годятся для формирования наноструктур, перед исследователями стоит задача разработки принципиально новых технологий. В настоящее время наиболее перспективными считаются два подхода, которые можно условно назвать:

- атомная сборка,
- самоорганизация.

Идея атомной сборки была предложена еще в 1960 г. знаменитым американским физиком Р. Фейнманом: чтобы собрать нужную наноструктуру из

отдельных атомов, необходимо просто поместить нужный атом в нужное место [2]. Эта, казалось бы, фантастическая мысль стала реальностью с изобретением сканирующего туннельного микроскопа.

Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) был изобретен сотрудниками швейцарского отделения фирмы «IBM» Г. Биннигом и Г. Рорером в начале 1980-х годов, за что в 1986 г. им была присуждена Нобелевская премия по физике. Принцип работы СТМ несложен. Очень острая металлическая (например, вольфрамовая) игла (в идеале с одним атомом на острие) максимально близко подводится к поверхности исследуемого образца (на расстояние примерно 0.5—1.0 нм), но не касается его. В этом случае возникает вероятность квантового туннелирования (квантового перескока) электрона через этот промежуток. А если приложить напряжение между иглой и образцом, то через промежуток потечет туннельный ток. Направление тока зависит от полярности приложенного напряжения, а величина — от ширины промежутка. Так, изменение ширины лишь на 0.1 нм меняет ток на порядок величины, а если поддерживать ток постоянным с точностью 2%, то ширина промежутка будет оставаться неизменной с точностью 0.001 нм! Принципиально важно, что до 90% тока протекает через промежуток между «последним» атомом иглы и ближайшим к нему атомом исследуемой поверхности. Сканируя иглой поверхность образца и контролируя туннельный ток, можно получить топографическое изображение поверхности. А так как ток крайне локализован и сильно зависит от высоты рельефа поверхности, то получаемое изображение имеет чрезвычайно высокое разрешение: во многих случаях можно различить отдельные атомы, т.е. достичь атомного разрешения. Сканирующий туннельный микроскоп — это достаточно сложный и дорогой прибор, включающий в себя ряд устройств, каждое из которых воплощает достижения самых современных технологий. Во-первых, это пьезоэлектрическая система позиционирования иглы относительно образца, обеспечивающая точность перемещения 0.01 нм. Во-вторых, это совершенная система виброизоляции, без которой функционирование первой было бы просто невозможно. В-третьих, это компьютерная система, с помощью которой производится управление микроскопом, а также осуществляется сбор и обработка обширного массива данных в реальном

масштабе времени. Работа с атомным разрешением возможна только в чистых условиях сверхвысокого вакуума, что тоже требует соответствующего технического обеспечения.

Дополнительное достоинство СТМ — это то, что его можно использовать не только как исследовательский прибор, но и как инструмент для воздействия на атомы поверхности. Используя межатомные силы между атомом на кончике иглы и атомом на поверхности, а также электростатические силы, действующие со стороны иглы на поверхность, или же токи высокой плотности, можно цеплять атомы к игле, перемещать их по поверхности в нужное место, удалять ненужные, осаждать дополнительные атомы с иглы. Итак, для атомных манипуляций и наблюдения служит один и тот же прибор: можно сначала осмотреть поверхность, выбрать объект для манипуляций, провести их, а затем проверить результат.

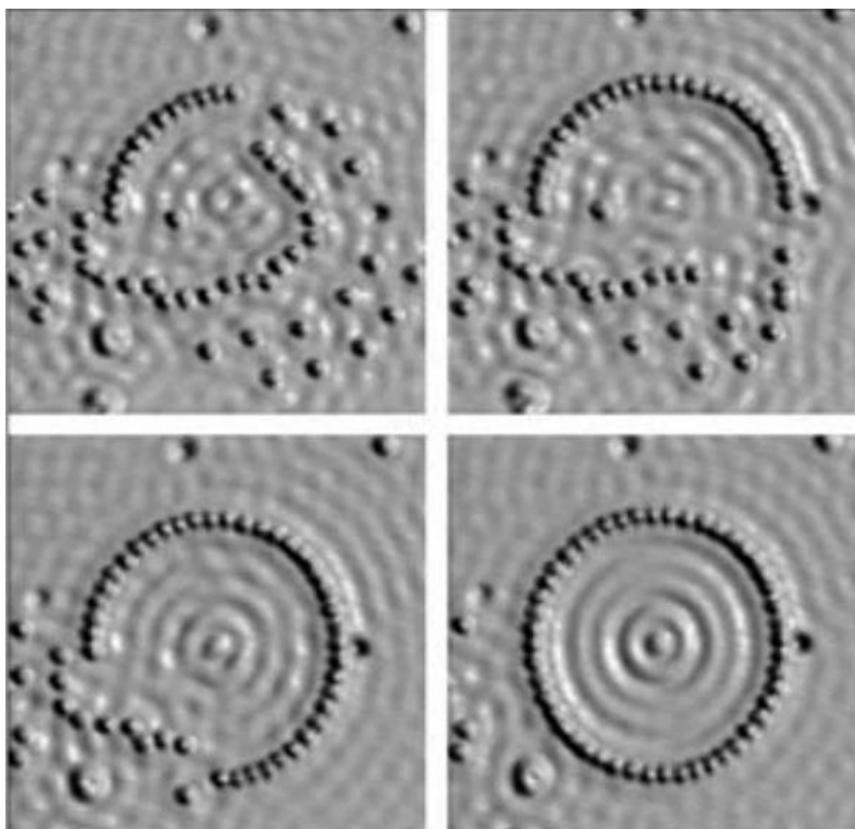


Рис.2. Набор последовательных СТМ-изображений, которые иллюстрируют процесс формирования «квантового загона» из 48 атомов Fe, адсорбированных на поверхности Cu(111).

Возможность таких атомных манипуляций была впервые продемонстрирована в начале 1990х годов группой американского физика Д. Эйглера. В качестве примера на рис.2 показано строительство «квантового загона» (окружности радиуса

7.1 нм, состоящей из 48 атомов железа на поверхности меди) [3]. Квантовый загон действует как двумерная яма цилиндрической формы для электронов поверхности. Круговые волны, видимые на СТМ-изображении внутри загона, — это стоячие электронные волны, существование которых предсказывает решение уравнения Шредингера для таких граничных условий.

Приведенный пример, конечно, достаточно эффектен, но необходимо отметить, что для формирования даже такой относительно простой наноструктуры требуются часы кропотливой работы оператора СТМ, что совершенно не годится для промышленного производства интегральных схем, где число элементов исчисляется миллионами и даже больше. В связи с этим возникло альтернативное направление формирования наноструктур — самоорганизация.

Принцип самоорганизации заключается в создании таких условий, чтобы система сама стремилась образовать наноструктуры, причем в достаточно больших количествах, спонтанным образом. Примером самоорганизации может служить формирование островков нанометрового размера при осаждении чужеродных атомов на поверхность твердого тела (рис. 3). Осажденные атомы мигрируют по поверхности и, соединяясь друг с другом, образуют островки. Этот процесс случайный. Поэтому островки различаются по размеру (одни крупнее, другие мельче) и распределены по поверхности случайно (где-то они расположены гуще, а где-то реже).

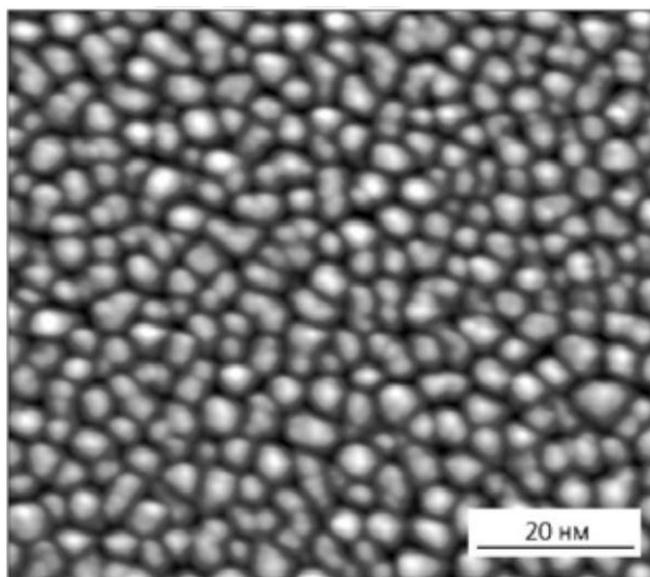


Рис.3. СТМ-изображение массива nanoостровков Si, полученных напылением пяти моноатомных слоев Si на поверхность Si(100), покрытую тонким слоем SiO₂.

Однако весьма желательно, чтобы все островки были одного и того же размера — ведь от их размера сильно зависят их свойства (например, система электронных уровней). Не менее важно, чтобы этот массив был однородным, а в идеале образовывал бы упорядоченную периодическую структуру, как изображено на рис.4 в нижнем ряду.

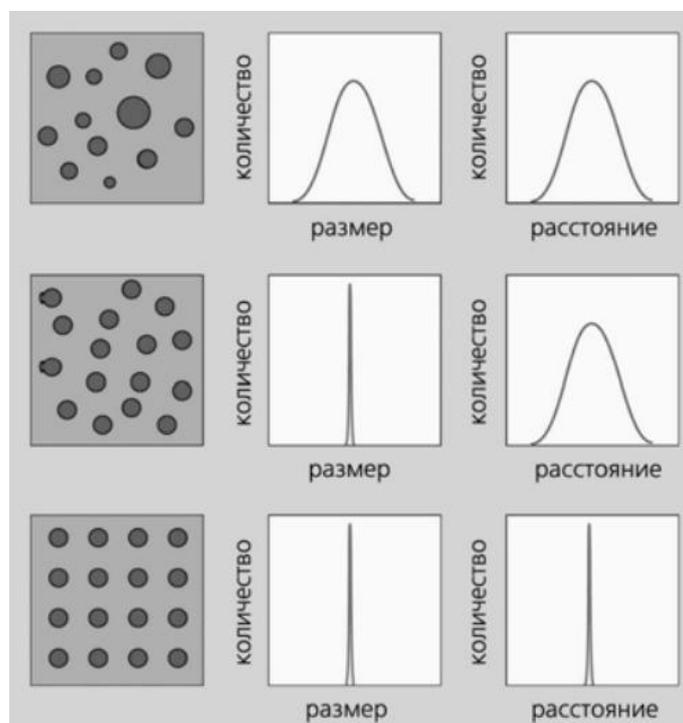


Рис.4. Типы массивов островков со схематической иллюстрацией их внешнего вида (первая колонка), распределением по размерам (вторая колонка) и по расстояниям между ближайшими островками (третья колонка). Верхний ряд — обычный массив островков. Средний ряд — неупорядоченный массив магических островков. Нижний ряд — упорядоченный массив магических островков.

Исследования [5] показали, что с помощью самоорганизации этот идеальный случай может быть реализован. Если на атомарно-чистую поверхность кремния Si(111) при температуре около 550°C в условиях сверхвысокого вакуума ($\sim 10^{-10}$ Торр) осадить примерно 1/3 моноатомного слоя алюминия, то на поверхности формируется упорядоченный массив нанокластеров — островков атомного размера (рис.5). Все нанокластеры идентичны: каждый из них состоит ровно из шести атомов Al. Такие кластеры называют магическими, так как число атомов в них не произвольное, а точно равно некоторому «магическому» числу (в данном случае шести). Как видно на рисунке, магические кластеры образуют к тому же упорядоченную периодическую структуру. Примечательно то, что, как показали

исследования других элементов, такое поведение характерно и для остальных металлов III группы: Ga [6] и In [7].

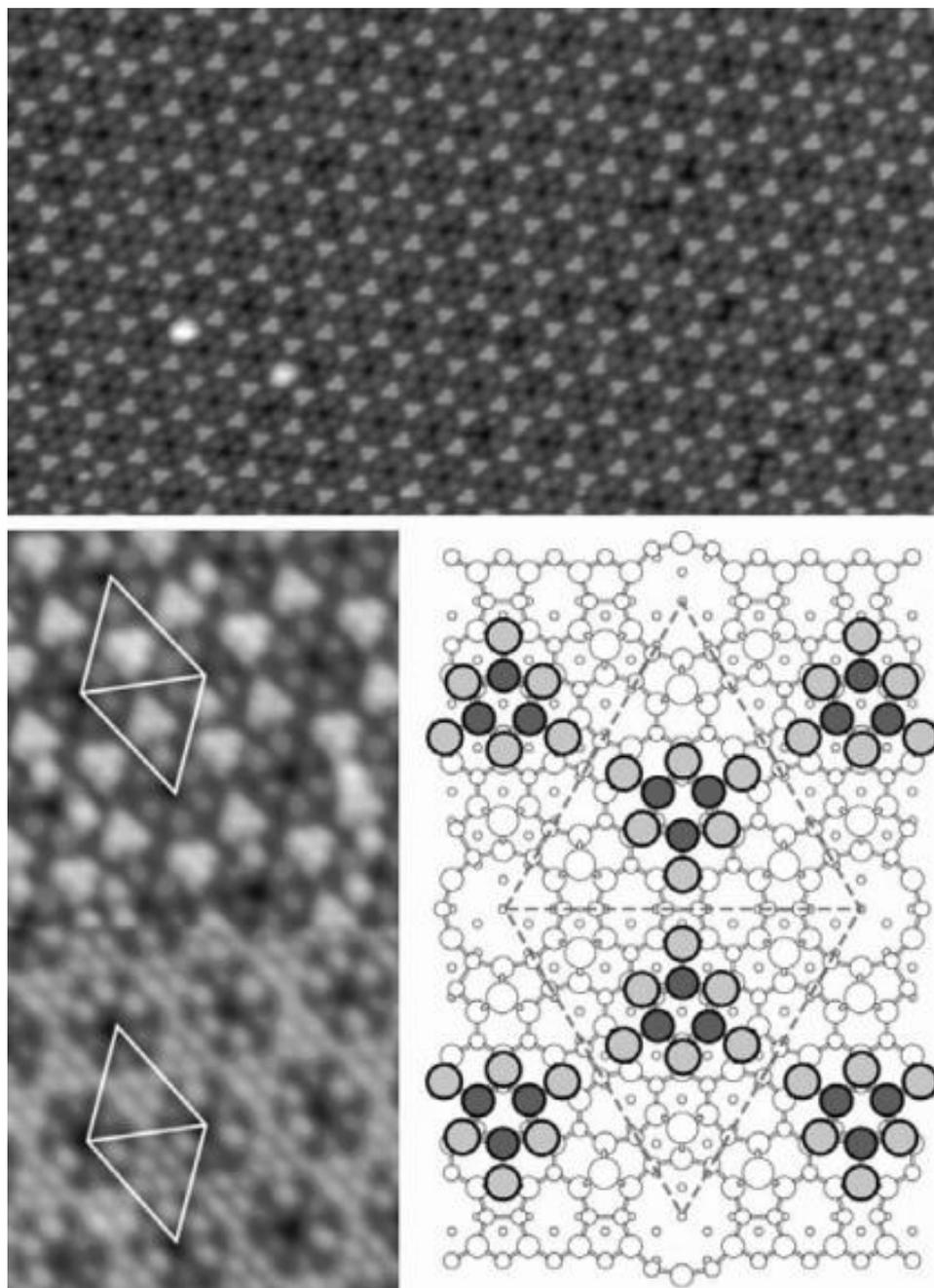


Рис.5. Упорядоченный массив магических кластеров Al, полученный на поверхности Si(111)-7×7 в результате самоорганизации осажденных атомов Al: STM изображение, иллюстрирующее общий вид массива (вверху) и увеличенное STM изображение нанокластеров (внизу) при различной полярности потенциала на образце (+2,0 В в верхней части и −2,0 В в нижней части изображения), а также схематическое изображение атомного строения магических кластеров. Каждый кластер состоит из шести атомов Al (светлые кружки) и трех атомов Si (темные кружки) [5].

Из-за того, что управляемый синтез наноструктур стал возможен только в последние годы, наноструктуры — это относительно новый объект физических исследований. Сама физика наноструктур как бы заполняет «щель» между такими традиционными областями, как атомная физика (где изучаются свойства отдельных атомов) и физика конденсированного состояния (в рамках которой изучают твердотельные вещества, количество атомов в которых практически бесконечно). По сути, наноструктура — это очень маленький фрагмент твердого тела, и отличие от объемного твердого тела тут, казалось бы, только в количестве атомов. Однако оказывается, что при таких малых размерах свойства структур могут очень сильно (качественно) отличаться от свойств объемных материалов. Например, такие характеристики, как температура плавления или ширина запрещенной зоны (в случае полупроводникового кристалла), у нанокластеров отличаются от объемных значений и, более того, зависят от числа атомов в кластере. С уменьшением числа атомов температура плавления уменьшается: кристаллики золота с размером 3 нм плавятся уже при комнатной температуре, тогда как «массивное» золото — при 1064°C ! А вот ширина запрещенной зоны полупроводниковых кластеров, напротив, с уменьшением числа атомов возрастает, причем немонотонным образом.

Многие из удивительных свойств наноструктур нам еще неизвестны, и поэтому в настоящее время ведутся обширные и интенсивные исследования по их выяснению. Особым стимулом здесь служит то, что в будущем электронные схемы будут строиться из наноэлементов, и конструкторам просто необходимо знать свойства этих элементов.

Разделяют такие способы получения наноструктур: один называется «сверху-вниз», а другой — «снизу-вверх».

«Сверху-вниз». У вас есть массивный образец, и вы его обрабатываете так, что получается очень маленький объект. Откалываете, или еще каким-нибудь образом обрабатываете. Сейчас один из рекордных примеров — это изготовление таким способом образца толщиной вообще в 1 атом. Пример: получение графена из графита.

Второй способ «снизу-вверх» — это собирать из отдельных атомов. С самых элементарных кусочков собирать объекты. Существуют такие методы напыления

атомными пучками — так называемая «молекулярно-лучевая эпитаксия». Ну, и существует еще большое количество разнообразных методов, которые всё время совершенствуются. И вот сейчас в области наномира используются оба способа — и сверху-вниз, и снизу вверх.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Moore G.E. // *Electronics*. 1965. V.38. №8. P.114—117.
- 2 Feynman R.P. // *Engineering and Science* (California Institute of Technology). 1960. V.23. P.22 (перепечатана в: *Journal of Microelectromechanical Systems*. 1992. V.1. P.60; см. также <http://www.its.caltech.edu/feynman/plenty.html>).
- 3 Crommie M.F., Lutz C.P., Eigler D.M. // *Nature*. 1993. V.363. P.524—527 (<http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/corral.html#stm16>).
- 4 Saranin A.A., Zotov A.V., Kotlyar V.G. et al. // *Appl. Surf. Sci.* 2005. V.243. P.199—203.
- 5 Kotlyar V.G., Zotov A.V., Saranin A.A. et al. // *Phys. Rev. B*. 2002. V.66. P.165401(1—4).
- 6 Chang H.H., Lai M.Y., Wei J.H. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2004. V.92. P.066103(1—4).
- 7 Li J.L., Jia J.F., Liang X.J. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2002. V.88. P.066101(1—4).
- 8 Kotlyar V.G., Zotov A.V., Saranin A.A. et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2003. V.91. P.026104(1—4).
- 9 Kroto H.W., Heath J.R., O'Brien S.C. et al. // *Nature*. 1985. V.318. P.162—163.
- 10 Iijima S., Ichikashi T. // *Nature*. 1993. V.363. P.603—605.
- 11 Singh A.K., Kumar V., Briere T.M., Kawazoe Y. // *Nano Letters*. 2002. V.2. P.1243—1248.
- 12 Saranin A.A., Zotov A.V., Kotlyar V.G. et al. // *Nano Letters*. 2004. V.4. P.1469—1473.