

УДК 530.145

К.М.Арынгазин, Э.К.Мусенова, Т.Е.Сейсембекова

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова (E-mail: emusenova@mail.ru)

Роль геометрических идей в нанотехнологии

В работе показано, что нанотехнология рождена и развивается именно благодаря применению математики, главным образом геометрических идей. В качестве доказательств этих предположений рассмотрены результаты нескольких экспериментальных исследований волновых свойств электронов в нанобъектах. Эти исследования и анализ их результатов показали, что геометрические идеи, как метод построения определенных форм, пространственных отношений в нанобъектах, играют главную роль в создании различных квантовых структур и в визуализации волн и атомов нанобъектов. Результаты, полученные на основе взаимосвязи математики, нанотехнологии и фундаментальной физики, могут открывать новые возможности в познании окружающей действительности, расширить методы исследования.

Ключевые слова: геометрические идеи, геометрический дизайн, квантовый мираж, нанотехнология, нанобъект.

В рождении и становлении нанотехнологии выдающуюся роль сыграли и играют геометрические идеи. Например, природа создала основу и придала уникальные свойства существующей окружающей действительности. Вселенная, галактики, звезды, планеты, атомы, молекулы, элементарные частицы, микромир, макромир, растения, животные и сам человек разумный обладают определенной геометрической структурой, формой и расположением, правильной симметрией. И она (природа) заложила фундамент для развития всего этого. В дальнейшем данные природой человеку разум и логика подсказали: «на бога надейся, но сам не плошай», действуй сообразно своему уму, мышлению, деятельности. Образно говоря, материал для этого под рукой, но принципу: кирпичи есть, раствор есть строй дом по своему дизайну, усовершенствуй, наведи порядок, красоту в этом мире. Создавай невиданное, твори, дерзай, совершенствуй его. Для этого природа дала также мудрую науку — физику, математику и др. Обычно математику сравнивают с кошкой, которая играет со своим хвостом. Бог с ним, с хвостом, но математика творит чудеса. Ей все подвластно. Познав ее, человек строит мир по своему усмотрению, по законам диалектики, логики, сообразно природе. Вот так и математика — строит мир по своему образу, по законам необходимости. По существу, природа и математика — родные сестры, или еще больше: если космический разум — царь, то математика — царица. Математика — через описание мира, а физика — строительством форм, изменяя формы и их соотношения, изменяет мир. Нанотехнология один из примеров этого взаимодействия. Взаимодействие природы, математики и физики, основу которых составляют пространство, время, материя, изменяет формы материи, формы движения материи, в результате человек получает новые формы движения, новые свойства, качества, новый материал, новый метод, способ познания и дальнейшего изменения.

Мы в этой работе хотим показать, что нанотехнология рождена и развивается именно благодаря применению математики, главным образом геометрических идей. Например, гипотеза де Бройля о волновой природе веществ, гипотеза Планка о кванте света являются одними из наиболее ярких не только физических, но и геометрических идей в современной физике и по глубине и математическому содержанию представляют собой крупный вклад в развитие представлений

человечества об окружающем мире, о его строении. Этими гипотезами мы входим в первооснову мира, в его фундамент, пространство, время и материю и обнаруживаем их единство и целостность. Раз не отделимы пространство, время и материя, значит, не отделимы геометрия и физика. Нет геометрии, нет физики. Нет физики, нет и геометрии. Она форма ее существования. Это единство наглядно показано в физической реальности — так называемых нанобъектах. Изменение пространственного распределения материи и ее пространственно-временного отношения в природе создает новую структуру, новое состояние характерного, например для микромира.

В качестве доказательств этих предположений рассмотрим результаты нескольких экспериментальных исследований волновых свойств электронов в нанобъектах. В этих исследованиях геометрические идеи подсказывают, чтобы мы построили разнообразные фигуры геометрических форм из атомов, т.е. квантовых загонов, например, круговой, треугольной, квадратной, шестиугольной и др. И получили разнообразные структуры микромира. И по изменению фигуры оценивали происходящий процесс, раскрывали сущность полученных новых качеств нанокристаллов.

Данная проблема отражена в прекрасных работах Е.В.Смирнова [1]. Мы рассматриваем ее со стороны применения геометрических идей и ограничиваемся исследованием волновых свойств электрона в нанобъектах.

Многочисленные опыты по дифракции микрочастиц на кристаллах подтвердили гипотезу де Бройля и выявили волновые свойства не только электронов, но и крупных микрочастиц: нейтронов, атомов, даже крупных молекул. Все это оказалось связанным с достижением нанотехнологии с применением геометрических идей.

Геометрический дизайн на атомном уровне

В 1992 г. лауреаты Нобелевской премии Г.Бинниг, Х.Рорер [2] предложили техническое устройство, называемое сканирующим туннельным микроскопом (СТМ), позволяющее получить изображение атомов (железо) и на атомарно гладкой поверхности проводников (медь). Высокая чувствительность туннельного тока к расстоянию между иглой СТМ и исследуемой поверхностью дает возможность проводить исследования с высокой точностью измерения.

Одним из важных достоинств СТМ являются конструкторские функции: захватывать отдельные атомы или молекулы и осуществлять их контрольное измерение вдоль поверхности проводника, собирая при этом из них различные структуры. Это было продемонстрировано в работе [3]. СТМ может удалять ненужные атомы, перестраивать, создавая новые структуры, позволяет обнаружить и исследовать геометрические формы стоячих волн де Бройля, возникающих вблизи атома на поверхности металла. Здесь идет речь о волновых свойствах электронов, образующих электронный газ на поверхности кристалла.

Чрезвычайно высокая разрешающая способность этого прибора позволяет «увидеть» поверхностную волну, изучить картину волн электронной плотности на поверхности проводника и «руками» управлять процессом строительства геометрических структур, топографию и осуществлять дизайн на атомном уровне. Следовательно, тем самым можно проводить на атомном уровне геометрический дизайн и с помощью СТМ, собрать квантовый загон различной геометрической модификации, которые позволяют исследовать волновые свойства микрочастиц, подтвердить гипотезу де Бройля на уровне нанотехнологии. Это удалось благодаря строительству загонов с помощью СТМ геометрической формы. Выясним, что такое квантовый загон.

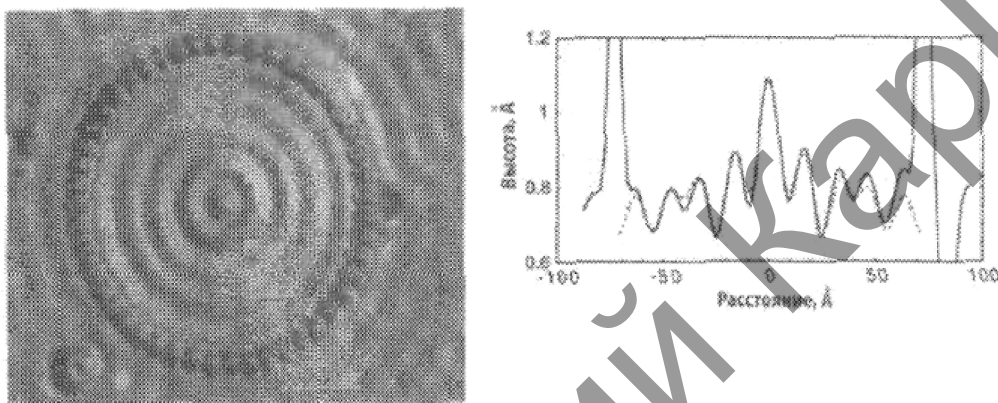
Геометрия квантовых загонов (потенциальных ям)

Квантовые загоны представляют замкнутые структуры, построенные СТМ из отдельных атомов на поверхности проводника, размеры которых сравнимы с длиной волны дебройлевского электрона. Они являются потенциальными ямами для электронов, попавших в загоны. На рисунке 1 представлен загон в форме окружности, состоящий из 48 атомов железа на гладкой поверхности меди [4]. Результаты эксперимента показывают, что поверхностные волны электрона внутри и вне загона обладают цилиндрической симметрией. Длина волны заметно превышает постоянную решетки и размер атома меди. Тем самым легко можно их отличить, и длина волны отвечает энергии электронов. Следовательно, СТМ дает возможность с большей точностью изучить связи геометрических форм, картины волн и происходящего физического процесса, т.е. электронную структуру поверхности кристалла по форме. Эти исследования показывают [5], что вид волновой картины сильно зависит от разности потенциалов между иглой СТМ и поверхностью кристалла меди,

т.е. от их расстояния (напр., рис. 2) [5]. Как видно из этого рисунка, изменение этой разности показывает резкое изменение картины волн от ярко выделенного в центре пика (рис. 2*a*) и до провала в центре (рис. 2*z*).

Это говорит о том, что картины этих волн зависят от геометрических форм загонов, т.е. от граничных условий, еще раз доказывая, что геометрические идеи играют большую роль в нанотехнологии. Это продемонстрировано на рисунке 3 в работе [6] — яркий пример «ручного» геометрического дизайна в нанотехнологии. Структура волнового поля для загонов отражает симметричные свойства этих геометрических фигур.

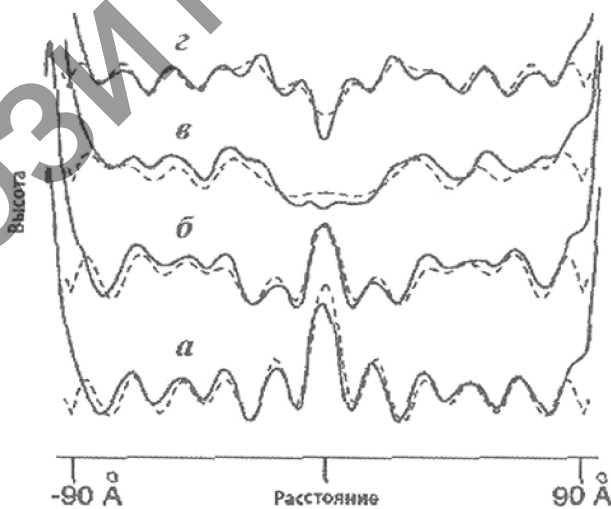
Следующим убедительным доказательством большой роли геометрических идей в нанотехнологии является так называемый квантовый мираж, появляющийся в геометрических точках, обнаруженных Н.С. Manaharan, С.Р. Lutz, D.M. Eigler [7].



СТМ-изображение загона и поверхностных волн электронной плотности внутри и вне его

Сравнение экспериментальных данных с результатами численных расчетов

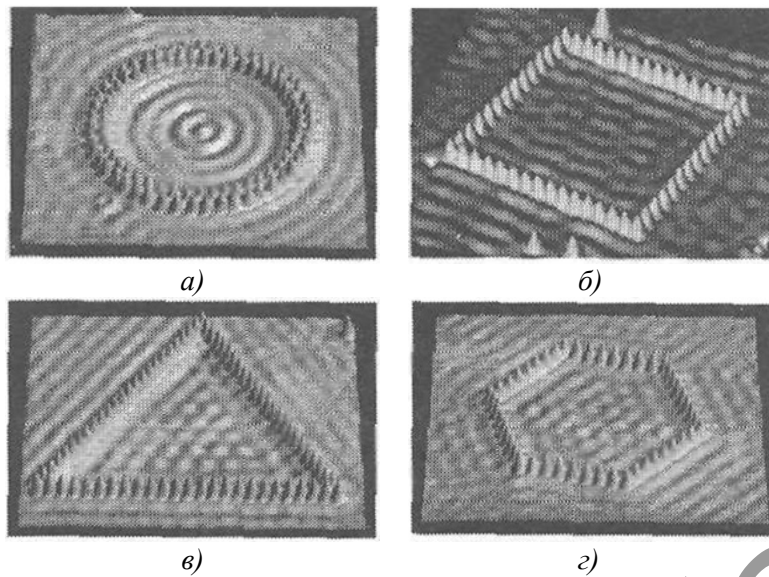
Рисунок 1. Квантовый загон из атомов железа на поверхности меди



a — $V = 0.41$ В; *b* — $V = 0.43$ В; *c* — $V = 0.45$ В; *z* — $V = 0.47$ В.

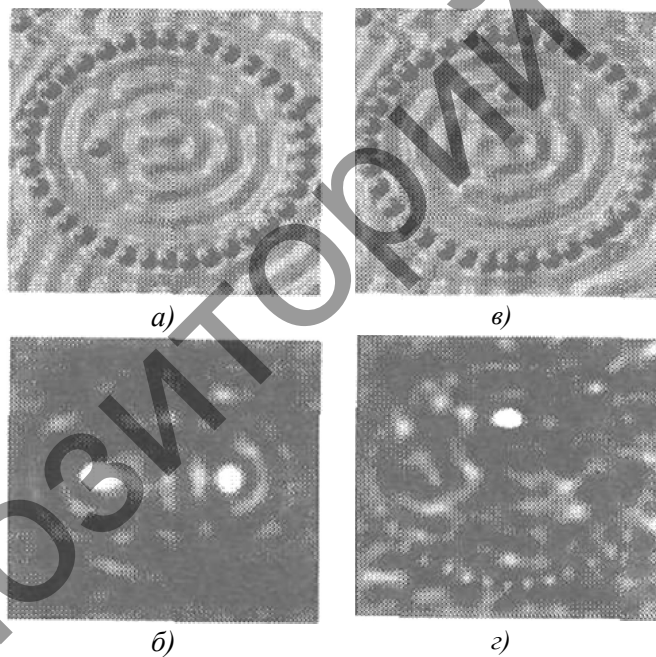
Сплошная линия — результаты эксперимента, пунктирная линия — результаты численных расчетов

Рисунок 2. Стоячие волны в круговом квантовом загоне для разных значений V



а — круглый; б — прямоугольный; в — треугольный; г — шестиугольный

Рисунок 3. Структура поверхностных электронных волн внутри и вне квантового загона для различных видов загонов



а — эллиптический загон с атомом Co в левом фокусе;
б — изображение атома Co и его миража; в — загон с атомом Co вне фокуса;
г — изображение атома Co в загоне, мираж отсутствует

Рисунок 4. Квантовый мираж

Нелинейная геометрическая оптика в нанобъектах

Суть этого явления в следующем [7]. На атомарно гладкой поверхности меди с помощью СТМ и из 36 магнитных атомов кобальта собирают эллиптической формы загон. В один из фокусов эллипса помещается атом кобальта. Исследование показало, что от атома кобальта, помещенного в одном из фокусов эллипса загона, идет сильный сигнал, в то же время (сравнительный с ним) поступает сигнал и от пустого фокуса, где нет атома кобальта. А если атом кобальта поместить вне фокуса, то

нет дополнительного сигнала. В первом случае говорят о квантовом мираже, а во втором — о его отсутствии (рис. 4).

По мнению авторов, это явление связано. Во-первых, атом кобальта обладает значительным магнитным моментом, поэтому атом помещают в одном из фокусов эллипса. В силу эффекта Конда [8] он оказывается окруженным облаком поверхностных электронов, экранирующих его магнитный момент. Это облако дает достаточно сильный сигнал при сканировании загона иглой СТМ. Во втором фокусе, где атома нет, появившийся пик электроной плотности представляет собой «мираж» — «изображение» электронного облака, окружающего первый атом, полученное с помощью эллиптической цепочки атомов кобальта. Во-вторых, главную роль возникновения квантового миража играет когерентное расстояние поверхностной электромагнитной волны де Бройля атомами кобальта, образующими эллиптический квантовый загон.

Известно, что эллипс представляет собой геометрическое место точек, сумма расстояний от которых до фокусов эллипса постоянна. Значит, наличие максимума интенсивности во втором фокусе может быть объяснено интерференцией дебройлевских волн электронов, рассеянных на атомах загона и приходящих во второй фокус в фазе, точнее, образованием внутри загона такой стоячей волны де Бройля, которая имеет максимумы как в первом, так и во втором фокусе эллипса.

Эксперимент также показал, что изменение эксцентриситета эллипса никак не сказывается на интенсивности сигнала – миража. Таким образом, эллиптический квантовый загон обладает свойствами не только захватывать и удерживать внутри себя поверхностные электроны меди, но и фокусировать их в отдельной точке загона.

Все эти эксперименты достаточно ярко демонстрируют огромную роль геометрии в исследованиях нанотехнологий и в раскрытии сущности физических явлений, происходящих в нанобъектах. Таким образом, можно сказать, что методом геометрических идей удастся управлять физическим процессом. Это не преувеличение роли геометрических идей, а констатация фактов.

Заключение

Эти исследования и анализ их результатов показывают, что геометрические идеи, как метод построения определенных форм, пространственных отношений в нанобъектах (окружность, треугольник, квадрат, эллипс и т.д.) играют главную роль в создании различных квантовых структур и в визуализации волн и атомов нанобъектов. Результаты, полученные на основе взаимосвязи математики, нанотехнологии и фундаментальной физики могут открывать новые возможности в познании окружающей действительности, расширить методы исследования.

Мы ограничились рассмотрением только узкого, но очень содержательного исследования, посвященного доказательству наличия волновых свойств электронов в нанобъектах.

References

- 1 Smirnov E.V. *Wave properties in electronical nanoobektah* // Physical education in Russian universities, Moscow, vol. 18, № 3. 2012, p. 80–91.
- 2 Binnig G., Rohrer H. *Scanning tunneling microscopy — from birth to adolescence*. Nobel lectures in physics // U.F.N. T. 154, Vol. 2, 1988, p. 261–278.
- 3 Eigler D.M., Schweizer E.K. *Positioning Single Atoms With a Scanning Tunneling Microscope* // Nature, vol. 344, 1990, p. 524–526.
- 4 Crommie M.F., Lutz C.P., Eigler D.M. *Confinement of Electrons to Quantum Corrals on a Metal Surface* // Science, vol. 262, 1993, p. 218–220.
- 5 Fiete G.A., Heller E.J. *Theory of quantum corrals and quantum mirages* // Rev. Mod. Phys, vol. 75, 2003, p. 933–948.
- 6 Collins G.P. *STM rounds up electron waves at the QM corral* // Physics Today, vol. 46, 1993, p. 17–19.
- 7 Manoharan H.C., Lutz C.P., Eigler D.M. *Quantum mirages formed by coherent projection of electronic structure* // Nature, vol. 403, 2000, p. 512–515.
- 8 Abrikosov A.A. *Fundamentals of the theory of metals*, Moscow: Science, 1987, p. 520.