

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЙ ПОДХОД К РАЗВИТИЮ 3D-НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Р.Р. Файзуллин, А.Р. Насыбуллин, З.Я. Халитов, Д.Н. Валеева

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, 10

Аннотация. В статье кратко охарактеризовано новое направление в нанoeлектронике, открывающее возможность создания трехмерных интегральных устройств с высоким быстродействием, энергоэффективностью и высокой плотностью расположения структурных элементов. Ключевой базовой ячейкой, для построения элементов 3D-нанoeлектроники, представляются нанотрубки, среди которых особо выделяются диэлектрические, как позволяющие получить структуры с довольно широким спектром электронных свойств.

Ключевые слова: нанoeлектроника, оптический интерфейс, коаксиальная нанотрубка, диэлектрические нанотрубки, хризотил.

Введение

В последние десятилетия становится все более очевидным кризис в развитии интегральных технологий, охватывающих сферу проектирования и производства как микро- так и нанoeлектроники. Бурный прогресс и впечатляющие достижения в этой области, имевшие место во второй половине 20-го и в начале 21-го столетий и основанные на планарном принципе конструирования интегральной электроники, естественным образом привели к истощению этой идеи и нарастанию проблем и ограничений, связанных с плотностью упаковки элементов на кристалле, производительностью и энергопотреблением. Следует отметить, что еще два десятилетия назад была отмечена необходимость перехода к трехмерным архитектурам наночипов [1,2]. В качестве структурных блоков таких элементов нанoeлектроники предлагались одностенные и многостенные углеродные нанотрубки, неорганические нанопроводники, квантовые точки и другие нанобъекты. В основу пространственной связи закладывался принцип «узловой» архитектуры, сформированной пересекающимися нанопроводниками (crossbar architecture). Несмотря на теоретическую возможность обеспечения высокой плотности упаковки элементов, такой подход не решает полностью проблему объемной связи между структурными элементами. Таким образом, можно сказать, что для придания нового мощного импульса развитию этой важной технологической области, необходима принципиально новая концептуальная основа разработки микро- и нанoeлектронных устройств.

Даже не касаясь проблемы перехода от элементов с токовым управлением к элементам, основанным на квантовой проводимости, можно назвать ряд проблем, все более нараставших в течение последних десятилетий и ставших серьезным препятствием на пути развития любых информационных систем. Не претендуя на полноту анализа, можно выделить два стратегически важных аспекта традиционных технологий. Во-первых, это ограниченность числа связей между элементами, органически присущая планарному принципу, заложенному в основу конструирования как интегральных схем, так и печатных плат, на которых они располагаются. Очевидно, что при переходе к разработке систем искусственного интеллекта (требующих многомерных полносвязных структур), это становится серьезнейшим препятствием. Очевидно также и то, что принципиальное реше-

ние этой проблемы возможно лишь с переходом к истинно трехмерным электронным устройствам. Термин «истинно» здесь использован с целью дистанцирования от многослойных печатных плат, являющихся, конечно же, паллиативом.

Вторым аспектом является недопустимо возрастающее время опроса больших запоминающих устройств (ЗУ), объемом $\sim 10^{14} \div 10^{16}$ бит/дюйм³, что резко ограничивает развитие информационных систем. Разделение ЗУ на десятки и сотни частей с параллельным опросом при существующем принципе проектирования приводит к резкому возрастанию габаритов электронного устройства, что весьма критично, например, в интеллектуальных системах вооружений. Вдобавок, такое разделение совершенно недостаточно, желательно деление ЗУ хотя бы на $10^3 \div 10^4$ частей параллельного опроса. Принципиальное решение данной задачи также возможно лишь при переходе к трехмерным структурам.

Таким образом, мы можем поставить вопрос: возможно ли эффективное производство электронных устройств, основанных на трехмерном конструировании, и каковы могут быть принципиальные идеи такого подхода? Авторы отвечают на этот вопрос положительно и считают, что здесь речь идет даже не о разработке какой-то новой технологии, а о начале совершенно нового направления развития электроники. Проиллюстрируем его основные идеи на примерах.

Сферическое ЗУ с оптическим интерфейсом

На рис. 1 показан принцип реализации сферического 3D-ЗУ большой емкости, информационное пространство которого разделено на ряд сегментов; каждый сегмент расположен на своей грани некоего многогранника. Сегмент состоит из большого числа блоков памяти, причем каждый блок имеет оптический интерфейс обмена как с центральным процессором (ЦП), расположенным внутри многогранника, так и с внешним, по отношению к многограннику, устройством. Блоки имеют собственные глобальные адреса в информационном пространстве всего 3D-ЗУ, а ячейки – в пределах блока, в прочих аспектах все блоки идентичны, а сегменты исполняются по традиционной планарной технологии.

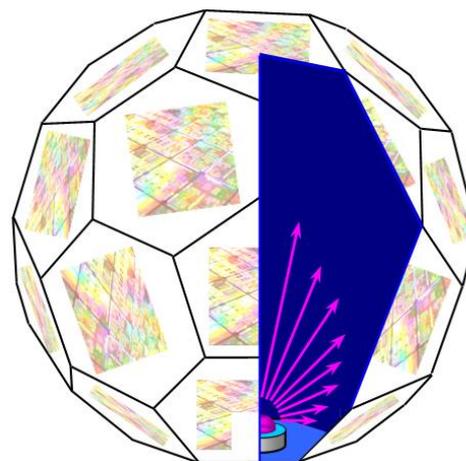


Рис. 1. Принцип устройства 3D-ЗУ большой емкости с оптическим внутриаппаратным интерфейсом

ЦП по оптическому каналу одновременно передает во все блоки вектор поиска и тактовые импульсы, перебирающие ячейки блоков, запуская поиск параллельно во всех блоках 3D-ЗУ. При соответствии содержимого одной из ячеек одного из блоков вектору, блок по оптическому каналу прерывает тактовые импульсы ЦП и сообщает ему свой адрес последовательным кодом. В совокупности с числом выданных тактовых импульсов адрес образует номер искомой ячейки 3D-ЗУ. Первичное заполнение 3D-ЗУ информацией может производиться по внешним оптическим каналам параллельно во все блоки путем наложения на конструкцию внешнего устройства записи.

Главный выигрыш во времени в предлагаемом устройстве достигается за счет одновременного параллельного поиска в огромном числе блоков памяти, что трудно реализуемо в компактных планарных устройствах. В предлагаемой конструкции это достигает-

ся за счет ее сферической симметрии, что позволяет одновременное обращение к огромному числу блоков по оптическому каналу. Сочетание сферической конструкции с оптическим интерфейсом обеспечивает высокую помехоустойчивость устройства. Заметим, что сферическая симметрия предлагаемого 3У допускает построение пространственных конструкций из связанных многогранников, то есть построение иерархических информационных систем.

Аналогичное устройство может иметь высокоточное быстродействующее АЦП с широким диапазоном входных напряжений, который делится между АЦП-блоками, каждый из которых имеет свое опорное напряжение. Центральный процессор такого устройства выдает световые импульсы, превращающиеся в АЦП-блоках в ступенчато нарастающее напряжение. Блок, в котором наступило равенство входному напряжению, как и ранее, прерывает импульсы ЦП и сообщает ему свой адрес по оптическому каналу. Комбинация адреса с числом выданных импульсов и является искомым цифровым эквивалентом входного напряжения. Точность такого АЦП определяется произведением числа АЦП-блоков на разрядность блока, и последний параметр обратно пропорционален быстродействию устройства; таким образом, оптимизация этих двух параметров производится исходя из технических условий. Очевидно, что предельное число блоков в сегменте, как и ранее, ограничено минимальными размерами их интегральных оптических интерфейсов.

3D наноэлектронное устройство с оптическим внутриаппаратным интерфейсом

Наиболее полное раскрытие возможностей, предлагаемых в идее 3D-проектирования электронных устройств, возможно при переходе на новом технологическом уровне к существовавшей на заре развития электроники и ныне уже почти забытой технологии навесного монтажа дискретных элементов. Выражение «на новом уровне» означает, что для обеспечения эффективности такого производства 3D-монтаж наноэлементов должен производиться в поле электронного микроскопа автоматически, то есть на основе программы распознавания образов, и на высокой скорости. При этом различные наноразмерные схемы, субблоки и блоки, из которых монтируется конечное изделие, могут производиться не только в различных производственных циклах, но и на разных производствах и даже в различных странах.

На рис. 2 показан пример пространственной схемы реализации такого подхода. Проводниковая связь между субблоками и блоками в такой технологии весьма затруднительна, поэтому она реализуется на основе оптических внутриаппаратных интерфейсов, лучи которых показаны на рис. 2 цветными линиями; оптический канал ЦП при этом играет роль общей шины. Очевидно, что излучение внутриаппаратных оптических интерфейсов должно иметь адресный, то есть направленный характер, что можно реализовать с помощью трубчатых коллиматоров. Наиболее удобным авторам представляется коллиматор на основе нанотрубки при использовании излучения с длиной волны, сравнимой с ее внутренним диаметром. Основанием для этого являются и ранее рассмотренный авторами

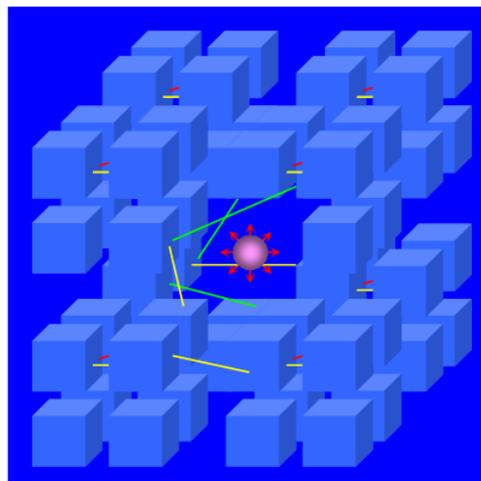


Рис. 2. Пространственная схема наноэлектронного устройства с оптическим внутриаппаратным интерфейсом

волноводный эффект в нанотрубках [3] и имеющиеся в литературе сообщения об аномальном каналировании частиц в нанотрубках [4-9]. Рассмотрим вкратце вопрос об апертуре нанотрубки в указанном диапазоне.

Продольное малоугловое рассеяние на коаксиальной нанотрубке

Оценим угловое распределение интенсивности излучения, дифрагированного коаксиальной нанотрубкой при продольном прохождении и на значительном расстоянии от нее. Таким образом, рассматривается задача Фраунгофера для нулевого узла обратной решетки (малоугловое рассеяние).

На рис. 3 изображены нанотрубка и волновые векторы падающего и рассеянного излучения (красные стрелки), цилиндрическая система координат обратного пространства $\{R, \varphi^*, z^*\}$, оси которой совпадают с одноименными осями кристаллографической системы координат нанотрубки $\{\rho, \varphi, z\}$ по направлениям, x^* - соответствующая декартова координата в обратном пространстве, служащая началом отсчета для угла φ^* , θ - угол рассеяния.

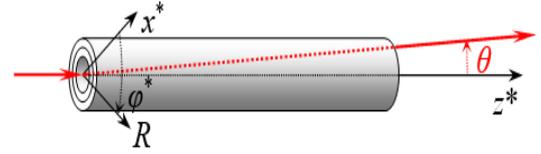


Рис. 3. Рассеяние продольно проходящего излучения на нанотрубке

Согласно [10, 11], координаты атомов упорядоченной хиральной коаксиальной нанотрубки имеют вид:

$$\begin{cases} \rho_{mj} = \rho_m + z_j = \rho_0 + md + z_j \\ \varphi_{mnvj} = \frac{1}{\rho_m} [(an + x_j) \cos(\gamma \mp \varepsilon_c) + (bv + y_j) \cos \varepsilon_c] + \varepsilon_m, \\ z_{mnvj} = (an + x_j) \sin(\gamma \mp \varepsilon_c) \mp (bv + y_j) \sin \varepsilon_c + \Delta z_m \end{cases} \quad (1)$$

где a, b и γ – параметры косоугольной решетки в слое плоского аналога, d – толщина слоя, $m = 0 \div M - 1$ – его номер, M – число слоев, ρ_m – радиус m -го слоя, $n = 0 \div N - 1$ – номер оборота винтовой узловой линии (или номер круговой узловой линии – в ахиральном случае), соответствующей направлению измерения параметра b , N – число оборотов узловой линии (или число круговых узловых линий) на цилиндре, $v = 0 \div p_m - 1$ – номер элементарной ячейки на обороте узловой линии (на круговой узловой линии). В качестве координат x_j, y_j и z_j j -го атома элементарной ячейки вдоль направлений измерения параметров a и b и вдоль нормали к слою, соответственно, могут применяться данные плоского аналога нанотрубки при соответствующем выборе начала в радиальном направлении. Параметры ε_m и Δz_m – азимутальный (угловой) и продольный (линейный) сдвиги m -го слоя относительно общего начала в случаях однослойных политипных модификаций многослойной нанотрубки равны $m\Delta\xi/\rho_m$ и $m\Delta z$, соответственно, где Δz – компонента межслоевого сдвига вдоль оси нанотрубки, а $\Delta\xi$ – в экваториальном направлении. Эти компоненты с помощью преобразования:

$$\Delta\xi = \Delta a \cos(\gamma \mp \varepsilon_c) + \Delta b \cos \varepsilon_c, \quad \Delta z = \Delta a \sin(\gamma \mp \varepsilon_c) \mp \Delta b \sin \varepsilon_c \quad (2)$$

выражаются через Δa и Δb - межслоевые сдвиги вдоль направлений измерения соответствующих параметров в начальной точке слоя, где $n = 0$ и $v = 0$. Верхние знаки в (1), (2) и далее соответствуют левовинтовой нанотрубке, нижние – правовинтовой.

Условиями существования упорядоченной коаксиальной нанотрубки являются кратность ее внутреннего радиуса толщине слоя: $\rho_0 = m_0 d$ (m_0 – целое) и наличие вектора

решетки развертки $\mathbf{r}_{sp} = \pm s\mathbf{a} + p\mathbf{b}$ (генератор цилиндрической решетки), модуль которого равен $2\pi d$. Тогда [4]:

$$\begin{aligned} s_m = s_0 + ms &= 2\pi\rho_m \frac{\sin \varepsilon_c}{a \sin \gamma}, & p_m = p_0 + mp &= 2\pi\rho_m \frac{\sin(\gamma \mp \varepsilon_c)}{b \sin \gamma}, & \sin \varepsilon_c &= \frac{sa \sin \gamma}{2\pi d}, \\ \cos \varepsilon_c &= \frac{pb \pm sa \cos \gamma}{2\pi d}, & \sin(\gamma \mp \varepsilon_c) &= \frac{pb \sin \gamma}{2\pi d}, & \cos(\gamma \mp \varepsilon_c) &= \frac{pb \cos \gamma \pm sa}{2\pi d}, \\ r_{sp} &= \sqrt{(as)^2 \pm 2spab \cos \gamma + (bp)^2} = 2\pi d, \end{aligned} \quad (3)$$

где (s_m, p_m) – целочисленные индексы хиральности m -го слоя, выражающие шаг и длину оборота узловой линии, соответственно, в единицах элементарных ячеек.

Согласно [11] амплитуда дифракции на хиральной коаксиальной нанотрубке имеет вид:

$$\begin{aligned} A(R, \varphi^*, z^*) &= \sum_j f_j(R^*) \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{p_m-1} \exp\{2\pi i [R\rho_{mj} \cos(\varphi_{mnvj} - \varphi^*) + z_{mnvj} z^*]\} = \\ &= \sum_{m,n,v,j} f_j(R^*) \exp(2\pi i z_{mnvj} z^*) \exp[2\pi i R\rho_{mj} \cos(\varphi_{mnvj} - \varphi^*)], \end{aligned} \quad (4)$$

где R^* – модуль вектора обратного пространства, f – рассеивающая способность атома. Рассматриваемая задача соответствует случаю: $z^* = 0$, тогда амплитуда перейдет в:

$$A(R, \varphi^*) = \sum_{m,n,v,j} f_j(R) \exp[2\pi i R\rho_{mj} \cos(\varphi_{mnvj} - \varphi^*)]. \quad (5)$$

Разложим экспоненту по цилиндрическим волнам в соответствии с формулой Якоби–Ангера [12]:

$$\exp(i\alpha \cos \gamma) = J_0(\alpha) + 2 \sum_{q=1}^{\infty} i^q \cos(q\gamma) J_q(\alpha), \quad (6)$$

где J_q – функция Бесселя с целым индексом, что даст:

$$A(R, \varphi^*) = \sum_{m,n,v,j} f_j(R) \left\{ J_0(2\pi R\rho_{mj}) + 2 \sum_{q=1}^{\infty} i^q \cos[q(\varphi_{mnvj} - \varphi^*)] J_q(2\pi R\rho_{mj}) \right\}. \quad (7)$$

Так как все J_q , кроме J_0 , равны нулю при $R = 0$, отбросим второе слагаемое в фигурных скобках, а также, так как R – малый параметр, используем аппроксимацию:

$$J_0(\alpha) \approx \cos(\alpha). \quad (8)$$

Тогда:

$$\begin{aligned} A(R, \varphi^*) &\approx N \sum_{m,j} f_j(R) p_m \cos(2\pi R\rho_{mj}) = N \sum_{m,j} f_j(R) p_m \cos[2\pi R(\rho_m + z_j)] = \\ &= N \sum_{m,j} f_j(R) p_m [\cos(2\pi R\rho_m) \cos(2\pi Rz_j) - \sin(2\pi R\rho_m) \sin(2\pi Rz_j)] = \\ &= NF_c \sum_{m=0}^{M-1} p_m \cos(2\pi R\rho_m) - NF_s \sum_{m=0}^{M-1} p_m \sin(2\pi R\rho_m), \end{aligned} \quad (9)$$

где $F_c = \sum_j f_j(R) \cos(2\pi Rz_j)$, $F_s = \sum_j f_j(R) \sin(2\pi Rz_j)$ и учтены значения сумм по n и v .

Принимая во внимание вид величин ρ_m и p_m , нетрудно видеть, что в амплитуде (9) для нас имеют значение четыре типа хорошо известных сумм по m :

$$\sum_{m=0}^{M-1} \begin{Bmatrix} \cos(mx + \alpha) \\ \sin(mx + \alpha) \end{Bmatrix} = \frac{\sin \frac{Mx}{2}}{\sin \frac{x}{2}} \cdot \begin{Bmatrix} \cos \left[\frac{x}{2}(M-1) + \alpha \right] \\ \sin \left[\frac{x}{2}(M-1) + \alpha \right] \end{Bmatrix}$$

и

$$\sum_{m=1}^{M-1} m \begin{Bmatrix} \cos(mx + \alpha) \\ \sin(mx + \alpha) \end{Bmatrix} = \frac{1}{\sin^2 \frac{x}{2}} \cdot \left[(M+1) \begin{Bmatrix} \cos(Mx + \alpha) \\ \sin(Mx + \alpha) \end{Bmatrix} - M \begin{Bmatrix} \cos(Mx + x + \alpha) \\ \sin(Mx + x + \alpha) \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{Bmatrix} \right], \quad (10)$$

где $x = 2\pi R d$, $\alpha = 2\pi R \rho_0$. Все эти суммы имеют максимумы в точках $x = 2\pi l \rightarrow R_l = l/d$, $l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ и, в том числе, в нашем случае – в точке $R = 0$. Однако для определения углового распределения рассеяния нам необходимо оценить ширину этих максимумов, что можно сделать следующим образом.

Из (10) видно, что во всех случаях результат суммирования представляет собой дробь, знаменатель которой, как показано, определяет положения главных максимумов, а числитель формирует высокочастотные осцилляции, период которых зависит от параметра M – числа слоев нанотрубки. Примем за полуширину пика расстояние от его максимума до ближайшего нуля числителя, то есть величину $M\Delta x/2 = \pi \rightarrow \Delta x = 2\pi\Delta R d = 2\pi/M$. Тогда в линейных единицах обратного пространства полуширина распределения рассеянного излучения равна $\Delta R = 1/Md$, то есть обратной величине толщины стенки нанотрубки. Переход от линейной полуширины ΔR к угловой $\Delta\theta$ легко совершить с помощью уравнения Вульфа Брэгга в форме:

$$2 \sin \theta = R\lambda \quad \rightarrow \quad 2 \sin \Delta\theta = \Delta R\lambda \quad \rightarrow \quad \Delta\theta \approx \frac{\lambda}{2Md}, \quad (11)$$

где использована малость аргумента синуса, что при характерных размерах нанотрубок и жесткого рентгеновского излучения оценочно дает: $\Delta\theta \sim 10^{-2}$ рад.

Таким образом, для улучшения угловой селективности, то есть уменьшения $\Delta\theta$, нужно либо уменьшать длину волны излучения, либо увеличивать толщину стенки трубки. Второй вариант можно реализовать, например, с помощью хризотильных нанотрубок типа «Повлен», названных так по имени горы в Югославии, где они были обнаружены [13, 15]. Числа слоев M этих нанотрубок настолько велики, что внешние слои полигонизируются, приобретая граненую форму.

Нанотрубки как основа элементной базы 3D-электроники

Одним из центральных вопросов предлагаемой технологии является характер монтируемой дискретной наноразмерной элементной базы. Несомненно, что сегодня она уже должна основываться на эффектах, связанных с пространственным квантованием проводимости. При этом элементы должны быть дискретными и транспортабельными в поле электронного микроскопа, то есть не требующими для своей работы массивной кристаллической подложки. Авторы предлагают в качестве такой базы линейку элементов на основе нанотрубок, главным образом, диэлектрических (рис. 4), не исключая, впрочем, и использования углеродных трубок. Преимущество диэлектрических трубок, например, хри-

зотила, заключается в возможности синтеза проводящих и полупроводящих цилиндрических структур как внутри нанотрубки, так и на ее внешней поверхности. Думается, что такой подход позволит реализовать ряд структур, обеспечивающих довольно широкий спектр электронных свойств.

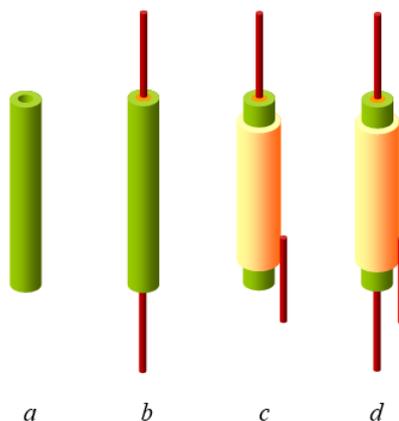


Рис. 4. Диэлектрическая нанотрубка (a) и на ее основе: резистор (b), конденсатор (c) и полевой транзистор (d)

В рамках предлагаемой технологии также, как и в наноэлектронике, основанной на углеродных нанотрубках, имеет место проблема обеспечения производства нанотрубками с требуемыми размерами и электронными свойствами. Так как последние определяются структурой трубки и ни один метод синтеза не дает строго монофазный продукт, единственным путем является опять-таки автоматическая выборка нанотрубок в поле электронного микроскопа на основе программы распознавания образов, причем образами будут являться, в том числе, и дифракционные картины нанотрубок.

Теоретической базой для такой технологии являются представления о структуре нанотрубок и теория дифракции на них. Структура любой слоистой нанотрубки основана на одной из четырех моделей, представленных на рис. 5, причем математическое описание первых трех моделей уже опубликовано [10, 11, 15-17]. Описание структуры четвертой – конусной модели нанотрубки, разрабатывается; соответствующие теории дифракции развиваются параллельно. Это же касается вышеупомянутой радиальной цилиндрической структуры, двумерная модель которой приведена на рис. 6.

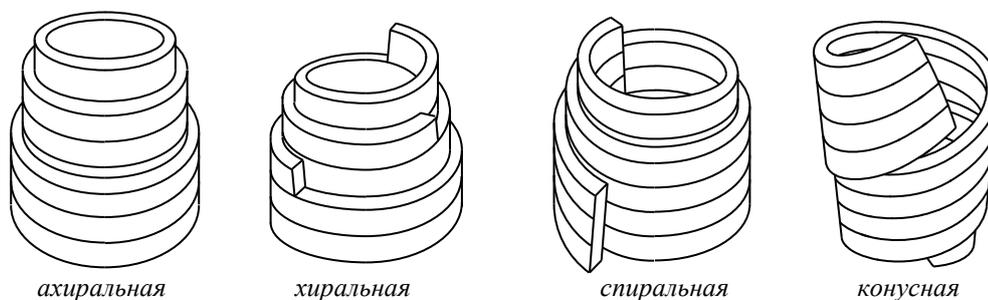


Рис. 5. Модели структуры слоистых нанотрубок

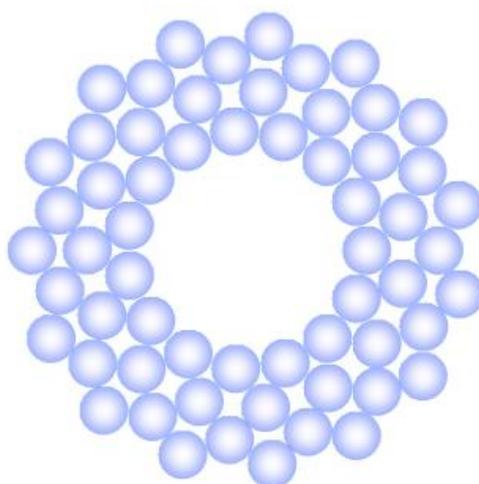


Рис. 6. Двумерная модель радиальной цилиндрической структуры

Заключение

Переход к сферическим нанoeлектронным устройствам с оптическим внутриаппаратным интерфейсом обещает уже сегодня решить такие важные проблемы как резкое увеличение скорости работы со сверхбольшими 3У или создание высокоскоростных и высокоточных ЦАП. Можно утверждать, что уровень компетенций современных отечественных электронных технологий уже позволяет поставить такие задачи в практической плоскости.

Развитие истинно трехмерного проектирования 3D нанoeлектронных устройств, предложенное во второй части статьи, несмотря на имеющиеся заделы, требует разработки как некоторых фундаментальных вопросов, так и ряда прикладных компетенций. Однако, перспективы, открываемые этим направлением для систем искусственного интеллекта (и не только) настолько многообещающи, что такие разработки позволили бы обеспечить серьезный приоритет нашей страны в важнейшей области критических технологий.

Список источников

1. Lyshevski S.E. Nanotechnology and Super High-Density Three-Dimensional Nanoelectronics and NanoICs. / S.E. Lyshevski // Third IEEE Conference on Nanotechnology, 2003. - 655-658.
2. Zhirnov V.V. New frontiers: Self-assembly and nanoelectronics / V.V. Zhirnov, D.J.C. Herr // Compute. - N 1 – 2001. - P. 34-43.
3. Figovsky O. The distribution of short-wave radiation in an internal hole of nanotube / O. Figovsky, D. Pashin, Z. Khalitov, E. Semenov // Chemistry & Chemical Technology. – 2012. - V. 6, 3. - P. 257-262.
4. Дабагов С.Б. Канализирование нейтральных частиц в микро- и нанокapиллярах / С.Б. Дабагов // Успехи физических наук, РАН. – 2003. – 173, 10. - С. 1083-1106.
5. Геворгян Л.А. Канализирование в одностеночных нанотубах / Л.А. Геворгян, К.А.Испирян, Р.К. Испирян // Письма в ЖЭТФ. – 1997. - 66, 5 - С. 304-307.
6. Матюхин С.И. Динамика ориентированного взаимодействия ускоренных частиц с нехиральными углеродными нанотрубками / С.И. Матюхин, С.Ю. Гришина // Письма в ЖТФ. – 2004. - 30, 20. - С. 76-82.

7. Матюхин С.И. Кинетика ориентированного взаимодействия ускоренных частиц с нехиральными углеродными нанотрубками / С.И. Матюхин, С.Ю. Гришина // Письма в ЖТФ. – 2005. – 31, 8. - С. 12-18.
8. Матюхин С.И., Гришина С.Ю. Кинетика ориентированного взаимодействия ускоренных частиц с углеродными armchair- и zigzag-нанотрубками / С.И. Матюхин, С.Ю. Гришина // Письма в ЖТФ. – 2006. – 32, 1. - С. 27-34.
9. Матюхин С.И. Критические параметры каналирования в нанотрубках / С.И. Матюхин, К.Ю. Фроленков // Письма в ЖТФ. – 2007. - 33, 2. - С. 10-30.
10. Khalitov Z. Structure of ordered coaxial and scroll nanotubes: general approach / Z. Khalitov, A. Khadiev, D. Valeeva and D. Pashin // Acta Cryst. - 2016. - A72. - P. 36–49.
11. Khalitov Z. Quantitative theory of diffraction by ordered coaxial nanotubes: reciprocal-lattice and diffraction pattern indexing / Z. Khalitov, A. Khadiev, D. Valeeva and D. Pashin. Acta Cryst. - 2016. - A72. – P. 684–695.
12. Абрамовиц М. Справочник по специальным функциям / М. Абрамовиц, И. Стиган. – М.: «Наука», 1979. – 832 с.
13. Devouard B. First evidence of synthetic polygonal serpentines / B. Devouard, A. Baronnet, G. Van Tendeloo, S. Amelinckx // Eur. J. Mineral. – 9. P. 539-546.
14. Baronnet A. Topology and crystal growth of natural chrysotile and polygonal serpentine / A. Baronnet & B. Devouard // J. Crystal Growth – 1966. - 122. – P. 956-960.
15. Khalitov Z. Electron diffraction patterns from scroll nanotubes: interpretation peculiarities / Zufar Khalitov, Azat Khadiev and Dmitry Pashin // J. Appl. Cryst. - 2015. – 48. P. 29–36.
16. Khadiev Z. Quantitative theory of diffraction by cylindrical scroll nanotubes / A. Khadiev and Z. Khalitov // Acta Cryst. - 2018. - A74, P.P. 233–244.
17. Figovsky O. Structure and Diffraction by Radial Cylindrical Crystals: Two-Dimensional Case / O. Figovsky, I. Nasyrov, D. Pashin, Z. Khalitov // Scientific Israel - Technological Advantages. - 2012. - 4, 1. - P. 79-86.

PRINCIPAL APPROACH TO DEVELOPMENT 3D-NANOELECTRONICS

R.R. Faizullin, A.R. Nasybullin, Z.Ya. Khalitov, D.N. Valeeva

Kazan National Research Technical University them. A.N. Tupolev-KAI
10, st. Karl Marx, Kazan, 420111, Russian Federation

Annotation. The article briefly characterizes a new direction in nanoelectronics, which opens up the possibility of creating three-dimensional integrated devices with high speed, energy efficiency and high density of structural elements. The key base cell for constructing elements of 3D nanoelectronics is represented by nanotubes, among which dielectric ones stand out, as they make it possible to obtain structures with a fairly wide range of electronic properties.

Keywords: nanoelectronics, optical interface, coaxial nanotube, dielectric nanotubes, chrysotile.

Статья представлена в редакцию 15 июля 2023г.