

НАНОАНТЕННЫ: ПОДХОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Развитие нанотехнологий в электронике постепенно охватило все аспекты создания систем на кристалле, в том числе и антенные системы. С момента появления первых публикаций по теории наноантенн прошло более шести лет – срок, вполне достаточный, чтобы можно было подвести некоторые итоги. В предлагаемой работе обозначены лишь основные подходы к исследованию теории и техники наноантенн. Однако учитывая относительную молодость данного научного направления, уже такой анализ представляет несомненный интерес.

ИСТОРИЯ НАНОТРУБОК

Экспериментальное открытие нанотрубок стало результатом развернувшихся в конце 1980-х годов исследований недавно обнаруженных молекул фуллерена C_{60} . Как известно, фуллерен (C_{60}) был открыт группой Смоли, Крото и Керла в 1985 году [1], за что в 1996 году эти исследователи были удостоены Нобелевской премии по химии. Молекулы фуллерена – это полые сферические структуры (рис.1), напоминающие по форме футбольный мяч (за что их еще называют бакиболами – buckyballs) и обладающие, наряду со свойством сверхпроводимости, способностью интенсивного поглощения света.

Типичный метод синтеза фуллерена C_{60} на тот момент основывался на распылении графита в среде высокотемпературного электродугового разряда между близко расположенными графитовыми стержнями. В качестве побочного продукта формировались молекулы фуллерена и другие многоатомные углеродные образования. В 1991 году, экспериментируя с подобным методом синтеза в научно-исследовательской лаборатории компании NEC, японский физик доктор Самио Ииджима решил использовать дугу постоянного тока вместо применявшегося ранее переменного. При этом он обнаружил, что один из электродов оказывается сплошь покрытым пленкой образований из нановолокон. Исследования под электронным микроскопом показали [2, 3], что эти формирования имели вид трубчатых структур, диаметр которых не превышал нескольких нанометров, а длина составляла единицы микрон. На срезе нанотрубки

В.Слюсар, д.т.н.
swadim@inbox.ru

вдоль продольной оси было видно, что она состоит из нескольких слоев, представляющих собой гексагональную сетку атомов углерода. Независимо от числа слоев, расстояние между ними равно 0,34 нм, что в точности соответствует интервалу между слоями в кристаллическом графите.

Так были синтезированы углеродные нанотрубки – протяженные наноструктуры, состоящие из свернутых гексагональных сеток с атомами углерода в узлах. Первые их образцы имели многослойные стенки, однако уже в 1993 году Ииджима и Бетьюн (фирма IBM) почти одновременно сообщили о получении углеродных нанотрубок с однослойными стенками (рис.2). Вскоре последовал бум научных исследований в области нанотрубок, в том числе и на основе неуглеродных соединений (первые неуглеродные нанотрубки на структурах MoS_2 и WS_2 были синтезированы в 1992 году. [4]).

СВОЙСТВА НАНОТРУБОК

И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Уже первые годы исследований углеродных нанотрубок показали, что они обладают разнообразными электрическими свойствами: в зависимости от расположения в них атомов углерода (спирально или кольцами), нанотрубки ведут себя в отношении тока как проводники или полупроводники. На основе углеродных нанотрубок возможно также создание полупроводниковых гетероструктур или структур

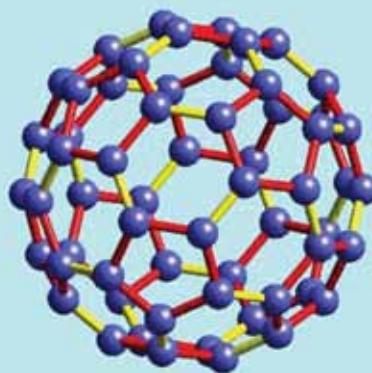


Рис. 1. Пример молекулы фуллерена



типа металл/полупроводник. В процессе роста нанотрубки в ней создается структурный дефект – заменяется один из углеродных шестиугольников пятиугольником и семиугольником (рис.3). В результате одна часть нанотрубки остается с металлической проводимостью, а другая – приобретает свойства полупроводника.

Необычные электрические свойства нанотрубок делают их одним из основных материалов наноэлектроники, прогресс в развитии которой является весьма существенным. На основе нанопроводников и нанотрубок уже созданы практически все базовые устройства, функционально эквивалентные современным цифровым или аналоговым схемам. Продemonстрированы экспериментальные образцы элементарных логических схем, модулей памяти на нанотрубках. В опытных образцах полевых транзисторов на основе единичной нанотрубки научились изменять проводимость на пять порядков, прикладывая запирающее напряжение в несколько вольт. Это позволяет создавать аналоговые устройства с динамическим диапазоном по выходному напряжению более 100 дБ.

Однако одной из самых важных и нерешенных проблем в области нанотехнологий остается обеспечение электрического контакта наноэлектронных устройств с макроскопическим уровнем без существенных потерь в потенциальной плотности тока, достижимой на наноуровне. Пока контакт со всеми нанотрубчатыми и нанопроводными устройствами реализуют посредством создания контактных площадок. Но этот путь не может быть эффективным для объединения множества наносистем. Действительно, топологические размеры наносистем существенно меньше, чем разрешение современного литографического оборудования. И относительно низкая плотность размещения контактных площадок перечеркивает достоинства возможной плотности упаковки наноэлектронных элементов.

Одно из возможных решений проблемы состоит в организации беспроводной связи с наноустройствами. При этом роль антенн могут выполнять все те же нанотрубки. Если каждый соединительный провод связан с нанотрубкой различной длины (следовательно, различной резонансной частоты), то проблема мультиплексирования сигналов входа/выхода мо-

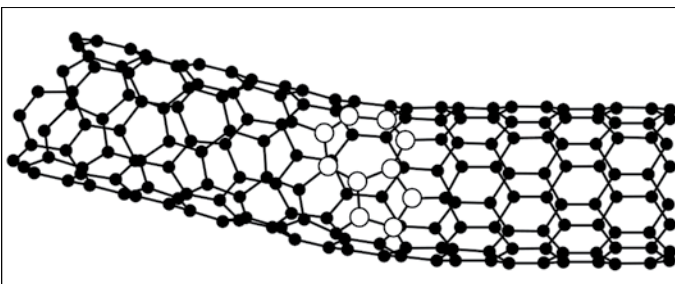


Рис.3. Нанотрубка с внедренным в нее дефектом "семиугольник-пятиугольник" приводит к изгибу трубки и возникновению перехода типа "металл-полупроводник" [11]

О ПРИОРИТЕТЕ ДАТ

Отметим, что существуют и более ранние свидетельства открытия углеродных нанотрубок. В 1992 году в статье в журнале Nature [5] утверждалось, что нанотрубки наблюдались еще в 1953 году. Годом ранее, в 1952 г., в статье советских ученых Радужкевича и Лукьяновича [6] сообщалось о результатах наблюдения в электронный микроскоп волокон с диаметром порядка 100 нм, полученных при термическом разложении окиси углерода на железном катализаторе. К сожалению, эти исследования не получили должного продолжения. В 1974–1975 гг. Эндо и др. опубликовали ряд работ [7] с описанием тонких трубок с диаметром менее 100 ангстрем, полученных методом конденсации из паров, однако более детального исследования их структуры также не проводилось. Именно к этому периоду относится и появление термина "нанотехнология", который в 1974 году впервые употребил Норио Танигути. Он назвал так производство изделий, погрешности изготовления которых составляют нанометры. В 1980-х годах данный термин был подхвачен Эриком К. Дрекслером, использовавшим его в своей книге "Машины создания М.Б. Локомотивы, двигатели, механизмы созидания и т.п.: грядёт эра нанотехнологии" ("Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology"), вышедшей в 1986 году. Этим термином он называл новую область науки, которую исследовал при работе над диссертацией доктора философии в Массачусетском технологическом институте.

Помимо экспериментальных свидетельств, известно множество теоретических работ по предсказанию существования такой аллотропной формы углерода. Так, М.Ю.Корнилов не только предсказал существование однослойных углеродных нанотрубок в 1977 г. [8], но и высказал гипотезу об их чрезвычайной упругости. В своей работе [9] химик Джонс (Дедалус) в 1986 г. размышлял о гипотетических на тот момент свернутых трубах графита. В работе Л. А.Чернозатонского и др. [10], вышедшей в тот же год, что и публикация Ииджимы, были также описаны углеродные нанотрубки.

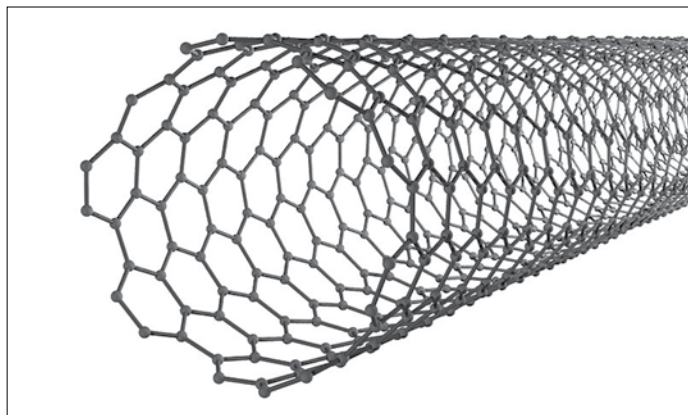


Рис.2. Однослойная углеродная нанотрубка

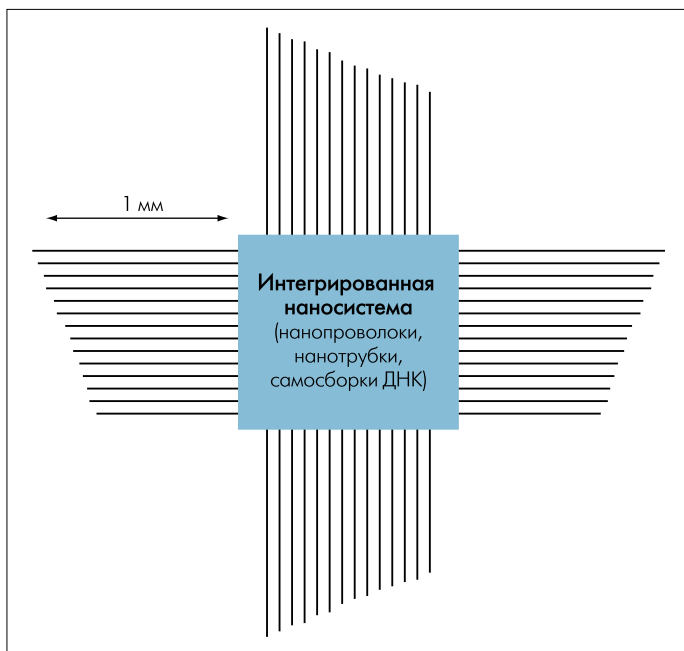


Рис.4. Наносистема с решетками наноантенн для беспроводной связи с взаимодействующими макроустройствами [12]

жет быть перенесена из пространственной области в спектральную. Следовательно, ослабляя требования к высокому разрешению литографического процесса для соединительных проводов, можно существенно снизить стоимость наноэлектронных изделий. Идея беспроводных соединений достаточно универсальна и легко масштабируема (рис.4) [12]. По такому же принципу возможна организация электропитания наноустройств, причем наноантенны будут использоваться в качестве ректенн (выпрямляющих антенн), в которых роль выпрямителей выполняют все те же нанотрубки с внедренным дефектом атомной сетки. Подобные модификации наноструктур позволяют перейти от пассивных наноантенн к активным решениям, обладающим в дополнение к пространственно-избирательным и частотно-селективным свойствам возможностью прямого усиления принятых сигналов.

Еще одна потенциальная область применения наноантенн связана с использованием наноустройств в качестве химических или биологических датчиков. Но наиболее важными для наноантенн остаются традиционные сферы применения антенной техники, где актуальна миниатюризация устройств.

СОВРЕМЕННАЯ ТЕОРИЯ НАНОАНТЕНН

Следует отметить, что непродолжительная пока история теории наноантенн уже успела повторить в своем развитии процесс становления теории электрически малых антенн (ЭМА) [13]. Подобно теории Чу для ЭМА, в 2002 году Бурке предложил RLC-модель одиночной нанотрубки, на которой он пояснил специфику работы наноантенн, рассмотрев модель радиочастотной цепи для линии передачи, состоящей из двух параллельных нанопроводников. Как показано в работе [14], особенность электрических свойств углеродных нанотрубок

может быть учтена включением в их эквивалентную электрическую схему, помимо распределенных по длине проводника традиционных электростатической емкости и магнитной индуктивности, двух дополнительных распределенных элементов: кинетической индуктивности и квантовой емкости.

Кинетическая индуктивность характеризует эффект "запасания" тока в нанопроводнике не за счет магнитного поля, а вследствие инерции движения носителей заряда. Электроны реагируют на приложенное электрическое поле не мгновенно, а с некоторой задержкой. Поэтому при воздействии периодически изменяющихся электрических полей соответствующие вариации скорости электронов отстают по фазе от изменений напряженности электрического поля. Внешне это проявляется аналогично наличию индуктивности.

Кинетическая энергия, обусловленная перемещением электронов при прохождении тока, может быть описана выражением [15]

$$K = \int_V n \frac{mv^2}{2} dV,$$

где n – концентрация электронов в проводнике, m и v – масса и скорость их движения. В результате интегрирования по объему проводника несложно получить

$$K = n \frac{mv^2}{2} \cdot V = n \frac{mv^2}{2} \cdot al,$$

где a – площадь поперечного сечения проводника, l – его длина.

Энергия, связанная с инерционностью движения электронов, подобна той, которая запасается в магнитном поле проводника с током. Это позволяет сопоставить магнитную энергию индуктивности с инерцией зарядов:

$$\frac{1}{2} L_k i^2 = \int_V n \frac{mv^2}{2} dV = n \frac{mv^2}{2} \cdot al.$$

В то же время скорость электронов в проводнике в любой момент времени может быть связана с протекающим током как $i = nev_a$ (e – заряд электрона). В результате получаем значение кинетической индуктивности

$$L_k = \frac{ml}{ne^2 a}.$$

В случае макроскопических проводников кинетическая индуктивность всегда много меньше обычной "магнитной" индуктивности. В тонких же проводниках, например пленках, площадь поперечного сечения a и концентрацию электронов n можно сделать достаточно малыми, и тогда кинетическая индуктивность становится доминирующей. Аналогичный эффект наблюдается и в нанотрубках, где кинетическая индуктивность обычно в 10 тыс. раз превышает распределенную "магнитную" индуктивность.

Столь значительная кинетическая компонента индуктивности вынуждает рассматривать нанотрубку в качестве квантовой линии передачи радиочастотных колебаний. Когда размеры поперечного сечения проводника сопоставимы с квантовомеханической длиной волны электрона, проводник по



существо превращается в одномодовый волновод для электронных волн. В 1956 году волноводную модель электрона одним из первых предложил польский ученый Збигнев Огжевальский (Zb.Ogrzewalski). Он изложил соответствующую идею в научном докладе в Щецинском политехническом институте, а затем подробно описал в неопубликованной рукописи [16]. Пространственная волноводная модель движения элементарной частицы построена им при помощи аналогии между уравнениями квантовой механики и уравнениями волноводов и объемных резонаторов, применяемых в теории переноса энергии электромагнитной волны [17].

Годом позже Рольф Ландауэр (Landauer) сформулировал основы квантового транспорта электронов в наноструктурах, показав, что проводимость каналов транспортирования электронов пропорциональна величине e^2/h^2 [18], где e – заряд электрона, h – постоянная Планка. Лишь в 1970 году Ландауэр развил свою идею до более конкретного вывода [19], указав на эффект квантования проводимости в соответствии с уточненным выражением, полученным им для одного спинового момента:

$$G = \frac{e^2}{h} \frac{T}{R},$$

где G – проводимость, T и R – коэффициенты передачи и приема, соответственно [20].

Интерес к данной теории в очередной раз был подогрев открытием квантового эффекта Холла, заключающегося в квантовании проводимости двумерного электронного газа в сильных магнитных полях при низких температурах. Целочисленный квантовый эффект Холла был открыт Клаусом фон Клитцингом (совместно с Г.Дордой и М.Пеппером). Именно Клаус фон Клитцинг в 1980 году впервые экспериментально определил численное значение квантовой проводимости $e^2/h = (25812,808 \text{ Ом})^{-1}$. С тех пор сообществом физиков прилагаются значительные усилия для изучения различных аспектов распространения электронной волны вдоль узких проводников с фиксированным сопротивлением постоянному току. Сегодня известно, что проводимость по постоянному току для узкого проводника (в отсутствие рассеивания по его длине) квантуется с учетом спинового момента электронов в единицах $2e^2/h$ [14, 21]. В пересчете на сопротивление, как отмечено в [21], $h/(2e^2) \approx 12,9 \text{ кОм}$.

Кинетическая индуктивность для одномерных волноводных систем, канализирующих электронные волны, в пересчете на единицу длины проводника описывается упрощенной квантованной зависимостью [22]:

$$L_k = \frac{h}{2e^2 v_F},$$

где h – постоянная Планка, v_F – скорость Ферми для носителей заряда ($v_F = \sqrt{\frac{2E_F}{m}}$). Для углеродных нанотрубок в [22] указана величина $v_F = 8 \cdot 10^5 \text{ м/с}$, соответственно, удельная линейная (погонная) кинетическая индуктивность составит $L_k = 16 \text{ нГ/мкм}$.

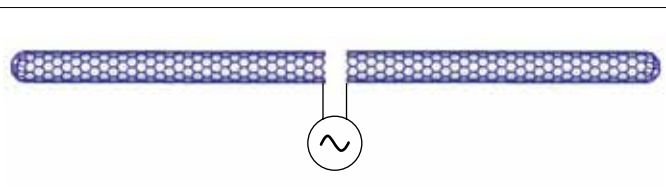


Рис.5. Антенна на основе углеродных нанотрубок

Понятие **квантовой емкости** было введено в 1987 году Сержем Лурье (Luryi) [23] для определения емкости слоя двумерного электронного газа: $C_Q = e^2 D$, где D – двумерная плотность состояний системы. В свою очередь, для двумерного

электронного газа $D = \frac{4m\pi}{h^2}$ (m – эффективная масса носителей). Чтобы внести в квантовую ферми-систему новую частицу (в соответствии с принципом Паули), ее энергия должна превышать уровень Ферми. В одномерных системах это может быть приравнено к удельной энергии на единицу длины. От этой удельной энергии может быть рассчитана погонная емкость на единицу длины, получившая наименование квантовой емкости.

Применительно к одномерному случаю нанотрубок в работе [22] квантовая емкость на единицу длины определяется как

$$C_Q = \frac{2e^2}{h \cdot v_F}.$$

При скорости Ферми для графена и углеродных нанотрубок $v_F = 8 \cdot 10^5 \text{ м/с}$ удельная квантовая емкость составляет порядка 100 аФ/мкм .

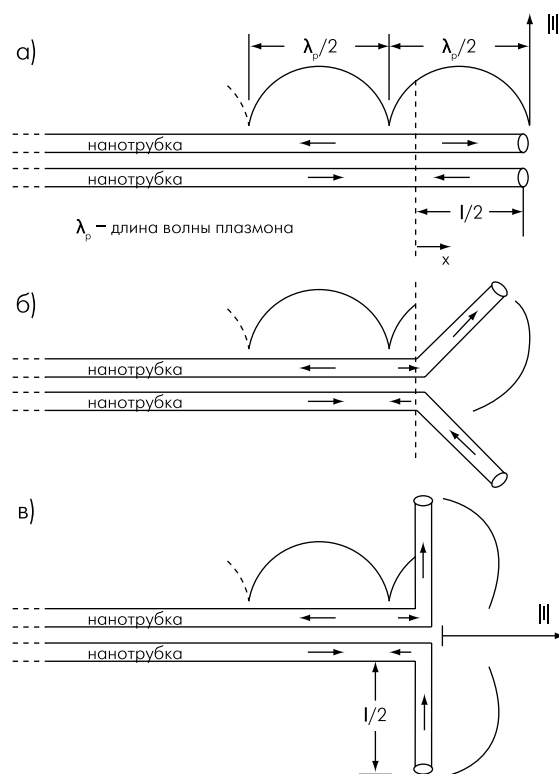


Рис.6. Последовательные стадии трансформации двухпроводной нанопроводной передачи в дипольную наноантенну

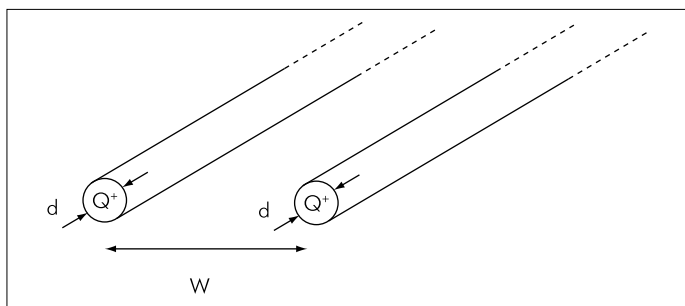


Рис.7. Типичная двухпроводная линия передачи

Одним из фундаментальных параметров любой антенны является текущее распределение тока. Оно определяет диаграмму направленности в режиме излучения, сопротивление излучения и реактанс, а также много других интересных свойств. Но если на ранних этапах развития теории антенн исследователи стремились получить аналитические выражения для текущего распределения тока в антенне, то на современном этапе в основном используются численные методы расчета параметров антенн. Одна из немногих геометрических конструкций, для которой доступны аналитические решения, – элементарная дипольная антенна. Фактически вся современная теория антенн использует ее как канонический пример, опираясь на характеристики дипольной антенны в предельном случае, когда отношение диаметра d проводника к его длине l стремится к нулю. С появлением углеродных нанотрубок длиной до 1 см становится возможным изготовить дипольные антенны (рис.5) с беспрецедентно малым отношением d/l , порядка 10^{-7} .

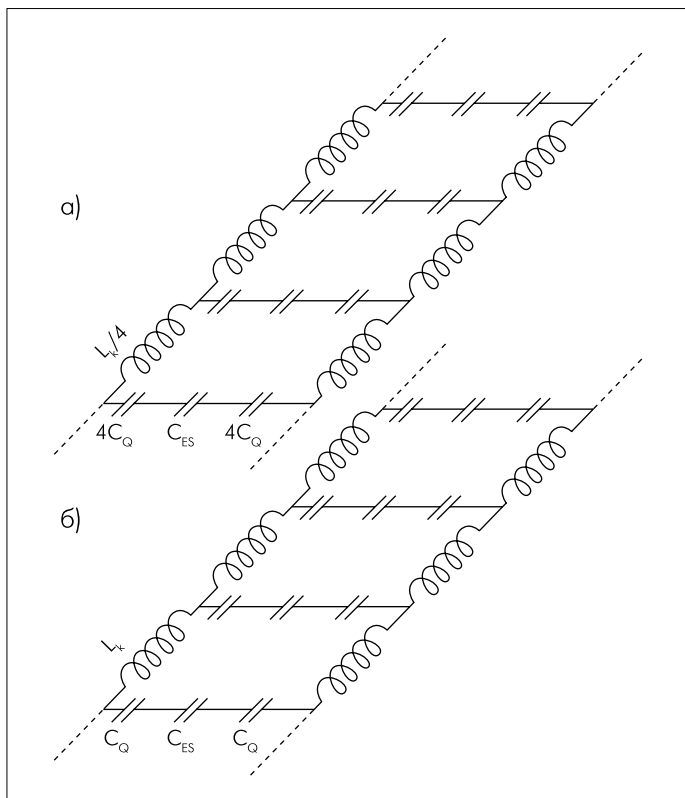


Рис.8. Эквивалентные электрические цепи двухпроводной нанолитии передачи: а) без учета спина электронов, б) с учетом спина [22]

На первый взгляд может показаться, что такая антенная конструкция представляет собой самую близкую физическую реализацию идеальной дипольной антенны (поскольку d/l является чрезвычайно малой величиной). Однако отмеченные выше особенности электродинамики углеродных нанотрубок свидетельствуют о нелинейности свойств антенн при качественном уменьшении их габаритов. В классической теории дипольных антенн предполагалось, что радиус диполя больше, чем глубина поверхностного слоя, и что потери на сопротивлении проводника достаточно малы, чтобы пренебречь ими при определении текущего распределения тока в антенне. Оба этих предположения не верны для нанопроводов. Поэтому классическая аналитическая теория не работает, когда отношение d/l становится достаточно малым.

В проводнике типа однослойной нанотрубки понятие глубины поверхностного слоя вообще лишено смысла, поскольку электронные волны под действием электрического поля могут перемещаться лишь вдоль длины провода, а не в поперечном направлении. Поэтому распределение носителей заряда фактически одномерно. Существенную роль играют и три других важных фактора: большое сопротивление, большие кинетическая индуктивность и квантовая емкость антенны.

Поскольку в антенной теории дипольная антенна обычно рассматривается как частный случай двухпроводной линии передачи (рис.6), подробно остановимся на анализе свойств фидерной линии, образованной парой нанопроводников (рис.7). Проводя аналогию, можно поставить в соответствие любой дипольной нанопроводной антенне ее эквивалентную фидерную модель, что позволит проводить расчет нанопроводных конструкций методами теории электрических цепей.

Для простоты рассмотрим два нанопровода диаметром d , разнесенные на удаление W друг от друга (см. рис.7). В пренебрежении спиновыми эффектами можно считать, что каждый провод имеет свою собственную кинетическую индуктивность. Магнитной индуктивностью можно пренебречь вследствие ее малой величины. Эквивалентная электрическая схема такой линии приведена на рис.8а. Электростатическую емкость двухпроводной линии можно рассчитать по формуле [22]

$$C_{ES} = \frac{\pi \epsilon}{\cosh^{-1}(W/d)} \approx \frac{\pi \epsilon}{\ln(W/d)}.$$

Следует принять во внимание, что в углеродных нанотрубках, благодаря их зонной структуре и спиновым моментам электронов, возможны четыре квантовых канала распространения электронов [24] (четыре энергетических состояния электронов проводимости): два канала для двух состояний спина. Каждый из этих каналов имеет собственную кинетическую индуктивность и квантовую емкость. Все четыре канала характеризуются общей электростатической емкостью относительно металлической подложки, что существенно влияет на радиочастотные свойства нанопроводников (рис.8б) [24]. Поскольку квантовые каналы параллельны, результирующая кинетичес-



кая индуктивность линии будет в четыре раза ниже, чем в одноканальной трактовке, а квантовая емкость – в четыре раза выше. Соответственно, примерно до 6,45 кОм ($h/4e^2$) уменьшится и квантовое сопротивление переменному току. С учетом этого, характеристический импеданс Z_c и волновую скорость v_p можно представить в виде [22]:

$$Z_c = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{R + i\omega L_K/4}{i\omega C_{Total}}} \quad \text{и} \quad v_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{(L_K/4)C_{Total}}},$$

где $(C_{Total})^{-1} = (C_{ES})^{-1} + (8C_Q)^{-1}$, R – активное сопротивление отдельно взятой нанотрубки на единицу длины. Индекс "р" для волновой скорости обозначает плазмон – квазичастицу, соответствующую коллективным колебаниям свободного электронного газа, в данном случае – одномерного.

Согласно выкладкам [22], длина плазмонной волны приблизительно в 100 раз меньше, чем длина электромагнитной волны в свободном пространстве для той же частоты. Как известно, скорость волны для традиционной двухпроводной линии передачи не зависит от расстояния между проводниками и равна скорости света. При использовании же нанотрубок интервал между ними оказывает заметное влияние на скорость распространения электромагнитной волны вследствие изменения общей емкости линии передачи. Это существенно изменяет текущее распределение тока по сравнению с тонкопроводной ситуацией.

Описанная двухпроводная линия передачи использована в работах [14, 22] в качестве эквивалентной модели дипольной наноантенны из углеродных нанотрубок. Опираясь на нее, в работе [14] показано, что в идеальном случае, при отсутствии потерь, основные аналитические соотношения для расчета параметров нанодиполей и их диаграмм излучения остаются теми же, что и в случае диполей макроразмеров. При этом вместо длины волны электромагнитных колебаний следует использовать значение ее плазмонного аналога λ_p .

Доступные методы создания наноантенн позволяют получить антенные решения, которые будут работать в области высоких омических потерь. Как отмечено в [22], распределение тока вдоль такой нанотрубки, запитанной с торца, является существенно нелинейным. В качестве примера на рис.9 показан характер изменения амплитуды тока вдоль плеч нанодиполя в зависимости от его погонного сопротивления. Как видно, при больших омических потерях вследствие значительного сопротивления току излучение в окружающую среду по существу происходит от электрически малой области вокруг зажимов наноантенны. Поэтому такой диполь даже при большой протяженности плеч будет оставаться электрически коротким. Однако, учитывая относительно малый период развития технологий производства длинных нанотрубок, в будущем ситуация может измениться к лучшему, если удастся синтезировать нанотрубки с более высокой проводимостью. Для этого могут быть использованы многослойные нанотрубки

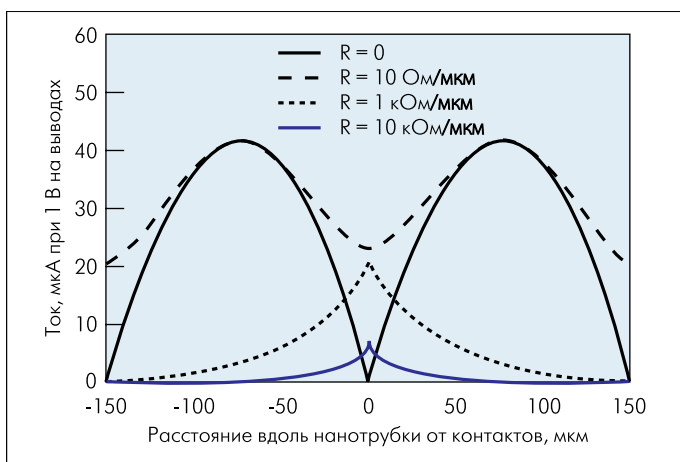


Рис.9. Распределение тока вдоль нанодиполя для различных погонных сопротивлений

ки или их жгуты, учитывая обратную зависимость квантового сопротивления нанотрубок от числа каналов транспорта электронов и мод электронных волн.

Одним из путей снижения потерь в наноантеннах является использование достаточно высокой частоты электромагнитных колебаний. Расчеты условий распространения волны в пассивной двухпроводной нанолнии передачи без дисперсии согласно [22] позволяют математически сформулировать ограничение $\omega L_K/4 \gg R$. При $R = 10$ кОм/мкм низкие потери достижимы для частотного диапазона выше 400 ГГц.

Несмотря на чрезвычайно низкую эффективность, многие из ныне предлагаемых наноэлектронных устройств демонстрируют чувствительность к движению единственного электрона или нескольких электронов (так называемые "одноэлектронные" устройства), поэтому низкий коэффициент полезного действия может быть, тем не менее, адекватным для электромагнитного взаимодействия на уровне наноустройств. К тому же, низкая эффективность сопровождается снижением добротности антенны и, как следствие, расширением ее полосы пропускания.

Кроме того, вопреки потерям, которые могут быть весьма высоки из-за малых значений радиуса поперечного сечения, углеродные нанотрубки обладают лучшей проводимостью по сравнению с медными проводниками аналогичного сечения [25].

Эффективность наноантенны будет наибольшей в резонансном случае, который является поэтому наиболее благоприятным режимом ее применения [25]. На резонансе мнимая часть входного импеданса обращается в ноль, и эффективность антенны определяется вещественным входным сопротивлением. Таким образом, нанотрубчатая антенна на резонансе может рассматриваться как естественный квантовый трансформатор, который преобразовывает характеристический импеданс свободного пространства (120π или 276,6 Ом) к квантовому импедансу ($h/4e^2$). Поскольку большинство наноустройств имеет высокий входной импеданс, это свойство наноантенн является довольно важным.

В общем случае следует отметить, что радиочастотная модель линии передачи при анализе наноантенн позволила получить ценные научные результаты. Однако допущения, присущие эквивалентной модели наноантенны как радиочастотной цепи, привели, по мнению Дж. Хансона (G. W. Hanson) [25], к погрешностям в оценке ее параметров. Поэтому им был использован более строгий подход, базирующийся на классических уравнениях Максвелла, преобразованных применительно к углеродной наноантенне конечной длины в интегральное уравнение Халлена. Последующее его решение было получено методом моментов.

По своей значимости работы Дж. Хансона аналогичны публикациям Р. Колина и С. Ротшильда (Robert E. Collin, S. Rothschild) в области исследования фундаментального предела добротности электрически малых антенн [13]. При этом, если для перехода от RLC-модели электрически малых антенн к электродинамической трактовке понадобилось 17 лет, в случае наноантенн этот период сократился до нескольких лет.

Интегральное уравнение Халлена [26, 27] позволило Дж. Хансону, аналогично авторам [14, 22], исследовать фундаментальные свойства дипольной передающей антенны на основе углеродных нанотрубок. В частности, в рамках полуклассического электродинамического метода им изучены свойства входного импеданса, текущего распределения тока, диаграммы направленности дипольных наноантенн в режиме излучения. Все эти исследования проведены в сравнении с медной антенной аналогичных размеров. Важнейший результат Дж. Хансона – уточнение значения плазмонной скорости, которое в отличие от предсказанной теорией радиочастотных цепей величины $v_p = 0,01c$, где c – скорость света в вакууме, должно быть в случае углеродных нанотрубок увеличено примерно вдвое ($v_p = 0,02c$). Это говорит о том, что различие в длинах волн электромагнитных колебаний, распространяющихся в свободном пространстве и в нанотрубке, следует сократить с указанных в работах [14, 22] 100 раз до 50 раз. Причина таких расхождений – в приблизительном характере методов теории цепей, не учитывающих процессы излучения и оперирующих аппроксимированными значениями индуктивности, емкости и сопротивления нанотрубок.

Коэффициент направленного действия дипольных излучателей на основе углеродных нанотрубок составляет около $D = 1,5$ [22], хотя их коэффициент усиления G будет чрезвычайно малым из-за низкой эффективности ($G = \eta D$). Антенна из углеродной нанотрубки конечной длины демонстрирует резонансы импеданса, когда ее длина приблизительно кратна половине плазмонной длины волны. Однако этот эффект, как отмечено Дж. Хансоном, наблюдается лишь в случае, когда частота электромагнитных волн превышает частоту релаксации электронов. При нарушении данного условия резонансные явления сильно подавлены, что объясняется низкой концентрацией свободных электронов в нанотрубке.

Наряду с дипольными конструкциями, в последнее время в сферу исследований вовлекаются и другие разновидности антенной геометрии. Так, в работе [28] предложена конструкция антенны Уда-Яги на основе нанотрубок для оптического диапазона электромагнитных волн, которая в принципе подходит и для более низкочастотных приложений. При этом, в отличие от традиционных решений, переход к наноразмерам позволяет реализовать два варианта создания директорных и рефлекторных элементов.

Первый сводится к классическому использованию различий в длине проводников. В частности, рефлектор делается удлиненным по сравнению с основным излучателем, что позволяет получить индуктивный импеданс и обеспечить отражение электромагнитной волны. Несколько других проводных элементов, которые короче резонансной плазмонной длины волны, располагают с другой стороны управляемого источника. Эти более короткие элементы – директоры – обладают емкостным импедансом. Результирующая диаграмма излучения такой антенны имеет узкий луч в направлении директора и минимум излучения – в направлении рефлектора.

В другом варианте наноантенна Уда-Яги строится из нанопроводников одинаковой длины, но различного диаметра. Это позволяет добиться их различной отстройки от резонанса. Если фаза колебаний нанопроводника относительно резонансного диполя отличается на величину, меньшую $\pi/2$, мы получим директор антенны Уда-Яги. Если относительная фаза больше, чем $\pi/2$, – это рефлекторный элемент. В [28] описан вариант двухэлементной антенны, у которой рефлекторный элемент имеет фазу колебаний $0,6\pi$, а директорный нановибратор – $0,4\pi$.

В заключение отметим, что теория и техника наноантенн находятся на начальном этапе своего развития. В известных публикациях основное внимание уделено только квантово-механической трактовке одномерных нанопроводников и нанотрубок. Задачей будущих исследований, в частности, является детальное изучение аспектов перехода от наноантенн к тонкопроводной версии диполя. Эта проблема актуальна, например, для многослойных нанотрубок, а также нанопроводников с диаметром меньше 100 нм, в отношении которых не выполняется строгий предел одномерности распространения электронных волн. Дополнительно это может пролить свет на механизмы потерь в тонких металлических антеннах, размер которых приближается к нанообласти. Что касается перспектив развития волноводной теории наноантенн, то, перефразируя автора [16], успехи на этом пути можно увязать с отходом от многих нынешних упрощений, касающихся модели описания электрона, применения концепции плоской волны, линейных трактовок уравнений поля с ограниченным количеством входящих в них переменных. Вполне возможно, что будущим исследователям потребуется разработать тео-



рию наноантенн, оперирующую нелинейными версиями уравнений Максвелла, объемным электрическим зарядом и многими другими, пока игнорируемыми факторами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **H.W.Kroto, J.R.Heath, S.C.O'Brien, R.F.Curl, R.E.Smalley.** C60: Buckminsterfullerene. – Nature, 1985, №318, p.162.
2. **S.Iijima.** Helical microtubules of graphitic carbon. – Nature, 1991, №354, p. 56–58.
3. **P.M.Ajayan, S.Iijima.** Smallest carbon nanotube. – Nature, 1992, №358, p. 23.
4. **Ивановский А.Л.** Углеродные нанотрубки: синтез и моделирование. – Успехи химии, 2002, №71 (3), с. 203.
5. **J.A.E. Gibson.** Early nanotubes? – Nature, 1992, №359, p. 369.
6. **Радужкевич Л.В., Лукьянович В.М.** О структуре углерода, образующегося при термическом разложении окиси углерода на железном контакте. – ЖФХ, 1952, №26, с. 88.
7. **A.Oberlin, M.Endo, and T.Koyama.** High resolution electron microscope observations of graphitized carbon fibers. – Carbon, 1976, №14, p. 133.
8. **Корнилов М.Ю.** Нужен трубчатый углерод. – Химия и жизнь, 1985, №8.
9. **D.E.H.Jones (Daedalus).** – New Scientist, 1986, №110, с. 80.
10. **Косаковская З.Я., Чернозатонский Л.А., Федоров Е.А.** Нановолоконная углеродная структура. – Письма в ЖЭТФ, 1992, №56, с. 26.
11. **Елецкий А.В.** Углеродные нанотрубки. – Успехи физических наук, 1997, т. 167, № 9, с. 945–972.
12. European Patent EP1784926 (WO/2007/011365). Interconnected Nanosystems. Burke P.J., 25.01.2007.
13. **Слюсар В.** 60 лет теории электрически малых антенн. Некоторые итоги. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2006, № 7, с. 10–19.
14. **P.J.Burke, S.Li, and Z.Yu.** Quantitative Theory of Nanowire and Nanotube Antenna Performance. – IEEE Transactions on Nanotechnology, 2006, Vol. 5; № 4, p. 314–334.
15. **Дж.Гудкайнд.** Применения сверхпроводимости. – Успехи физических наук, 1972, т. 106, вып. 3, с. 505–525.
16. **Збигнев И. Огжевальский.** Пространственные модели атомов, молекул и кристаллов. Рукопись. – www.nanoworld.org.ru/data/20061011/20070415/index.htm.
17. **Вейник А.И.** Термодинамическая пара. – Минск: Наука и техника, 1973.
18. **R. Landauer.** Spatial Variation of Currents and Fields Due to Localized Scatterers in Metallic Conduction. – IBM Journal of Research and Development, July 1957, Vol. 1, Issue 3, p. 233–231. www.research.ibm.com/journal/rd/013/ibmrd0103D.pdf.
19. **R.Landauer.** Electrical Resistance of Disordered One-Dimensional Lattices. – Philosophical Magazine, April 1970, Volume 21, Issue 172, p. 863–867.
20. **S.Douglas Stone, Aaron Szafer.** What is measured when you measure a resistance? – The Landauer formula revisited. – IBM Journal of Research and Development, May 1988, Vol. 32, Issue 3, p. 384–413.
21. **Supriyo Datta.** Electronic Transport in Mesoscopic Systems. – Cambridge Univ. Press, 1995.
22. **P. J. Burke.** An rf circuit model for carbon nanotubes. – IEEE Transactions on Nanotechnology, 2003, vol. 2, №. 1, p. 55–58, also v.3 № 2 p. 331.
23. **Serge Luryi.** Quantum capacitance devices. – Appl. Phys. Lett., 1988, no. 52, p. 501–503.
24. **M. S. Dresselhaus et al.** Carbon Nanotubes: Synthesis, Structure, Properties, and Applications. – Springer-Verlag, 2000.
25. **G.W.Hanson.** Fundamental Transmitting Properties of Carbon Nanotube Antennas. – IEEE Transactions on Antennas and Propagation, November 2005, vol. 53, №. 11, p. 3426–3435.
26. **Петров Б., Костромитин Г., Горемыкин Е.** Логопериодические вибраторные антенны. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2005.
27. **Hallen E.** Electromagnetic Theory. – London: Chapman & Hall, 1962.
28. **Jingjing Li, Alessandro Salandrino and Nader Engheta.** Shaping the Beam of Light in Nanometer Scales: A Yagi-Uda Nanoantenna in Optical Domain. – Phys. Rev. B., Vol. 76, Article 245403 (2007). <http://es.arxiv.org/pdf/cond-mat/0703086>.