

Процес відбору в мінімальну необхідну і достатню групу завершають, як тільки відібрані ознаки в сумі будуть спроможні нести інформацію о всіх технічних станах ЗТМ.

#### Висновок

Таким чином методика визначення інформативності та мінімізації кількості діагностичних параметрів основних вузлів автогрейдера на основі підходу І. М. Синдеева дозволяє зменшити до мінімуму кількість діагностуючих параметрів з шести до трьох (кількість обертів колінчастого валу, деформація рами та робочого устаткування, прискорення автогрейдера). Достатня кількість діагностичних параметрів виявилась меншою за кількість технічних станів, це можливо завдяки комплексному використанню результатів вимірювань параметрів при діагностуванні ЗТМ.

Розглянута методика дозволить розробляти прості, гнучкі та ефективні алгоритми діагностування машин, що в подальшому приведе до значного підвищення надійності систем діагностики ЗТМ.

УДК 621.396.67

## ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ НАНОРЕКТЕНН

К.т.н. Д.В. Грецких<sup>1</sup>, к.т.н. А.В. Гомозов<sup>1,2</sup>, Н.М. Цикаловский<sup>1</sup>, Ш.Ф.А. Аль-Самарай<sup>1</sup>

1. Харьковский национальный университет радиоэлектроники

2. Харьковское представительство генерального заказчика – Государственного космического агентства Украины

*В работе рассмотрены области применения наноректенн. Показана актуальность усовершенствования теории и техники наноректенн. Сформулированы задачи исследования наноразмерных ректенн. Особое внимание уделено вопросам, связанным с выбором выпрямительных диодов наноразмерных ректенн.*

*В роботі розглянуті області застосування наноректенн. Показано актуальність удосконалення теорії і техніки наноректенн. Сформульовані задачі дослідження нанорозмірних ректенн. Особливу увагу приділено питанням, які пов'язані з вибором випрямних діодів нанорозмірних ректенн.*

*Application field of nanorectennas in paper is considered. Actuality of improvement of theory and technique of nanorectenna is shown. The tasks of researches of nanosize rectennas are formulated. The special attention is given to the questions related to the choice of rectifier diodes of nanosize rectennas.*

**Ключевые слова:** наноректенна, углеродная нанотрубка, приемно-выпрямительный элемент, нанодиод.

#### Введение

Физика наноструктур является одной из наиболее интенсивно развивающихся отраслей науки и техники. Интерес к исследованию наноструктур (характерный размер порядка нескольких сотен нанометров и менее) вызван не только стремлением к дальнейшей миниатюризации устройств современной электроники, но

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Максименко, А. Н. Диагностика строительных, дорожных и подъемно-транспортных машин: учеб. пособие / А. Н. Максименко, Г. Л. Антипенко, Г. С. Лягушев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 302 с.

2. Киреев, А. Н. Диагностика транспортных средств: курс лекций / А. Н. Киреев. – Луганск: Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, 2007. – 37 с.

3. Викторова, Е. В. Результаты исследований динамических режимов работы автогрейдера / Е. В. Викторова, А. А. Коваль, Е. В. Сиора // Наука и молодежь в начале нового столетия : материалы 3-й междунар. науч.-практ. конф. студ., аспирантов и молодых ученых, 8-9 апреля 2010 г. – Губкин: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2010. – С. 25-28

4. Сафарбаков, А. М. Основы технической диагностики: учебное пособие / А. М. Сафарбаков, А. В. Лукьянов, С. В. Пахомов. – Иркутск: ИрГУПС, 2006. – 216 с.

также множеством принципиально новых физических и химических явлений, наблюдаемых в наноструктурах и не имеющих аналогов для макроскопических объектов.

Особый интерес, как с точки зрения фундаментальных исследований, так и с точки зрения практических приложений в нанoeлектронике, представляют богатые и разнообразные электромагнитные свойства наноматериалов. Поэтому в настоящее время в науке о наноматериалах формируется и интенсивно развивается новое направление – нанoeлектромагнетизм, синтезирующее макроскопическую электродинамику и микроскопическую теорию электронных свойств низкоразмерных структур. В работе коллектива лаборатории электродинамики неоднородных сред Института ядерных проблем БГУ [1] впервые вводится понятие нанoeлектромагнетизма, как самостоятельного направления исследований.

Электродинамическая задача на наноуровне формулируется как самосогласованная задача о движении носителей заряда в создаваемом ими электромагнитном поле. В этом случае традиционное для классической электродинамики введение материальных параметров среды становится невозможным или, по крайней мере, требует существенной модификации. В связи с этим возникают новые постановки задач для развития современной электродинамики наноструктур, а хорошо известные приемы и методы наполняются новым содержанием.

Среди различных типов наноструктур большой интерес возникает к углеродным нанотрубкам (УНТ), представляющим собой полые цилиндрические

углеродные макромолекулы. Не содержащая дефектов одностенная углеродная нанотрубка представляет собой свернутую в виде цилиндра ленту с упаковкой атомов по типу графита (рис. 1).

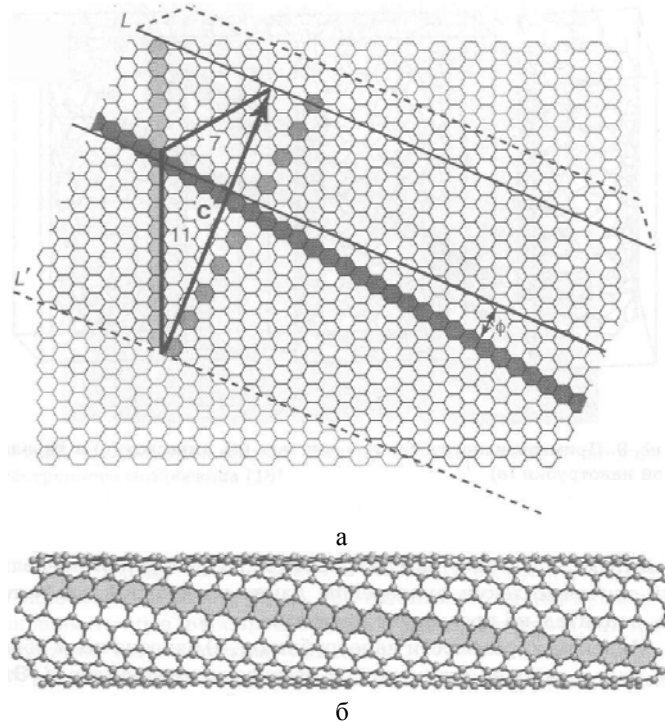


Рис. 1. Построение структурной модели нанотрубки:  
а – графитовый слой, б – нанотрубка

Чтобы представить пространственное расположение атомов в идеальной однослойной нанотрубке, отложим на графитовом слое (рис. 1, а) вектор  $C = (m\mathbf{a}_1, n\mathbf{a}_2)$ , где  $\mathbf{a}_1$  и  $\mathbf{a}_2$  – базисные векторы, а  $m$  и  $n$  – целые числа. Через точки начала и конца этого вектора проведем перпендикулярно ему две прямые ( $L$  и  $L'$ ) и вырежем из слоя бесконечную ленту вдоль этих линий. Свернем ленту в цилиндр так, чтобы прямые  $L$  и  $L'$  совместились. У этого цилиндра  $L$  будет образующей, а длина окружности равна модулю вектора  $C$ . Таким образом, получена структурная модель нанотрубки  $(m, n)$  (рис. 1, б). Такая трубка не образует швов при сворачивании.

В общем случае нанотрубки обладают винтовой осью симметрии (тогда они хиральны). Нехиральными оказываются нанотрубки  $(m, 0)$  и  $(m, m)$ , в которых углеродные шестиугольники ориентированы параллельно и перпендикулярно оси цилиндра, соответственно. По внешнему виду поперечного среза нанотрубки  $(m, 0)$  называют нанотрубками типа «зигзаг» (zigzag), а нанотрубки  $(m, m)$  – нанотрубками типа «кресло» (armchair) (рис. 2).

Индексы хиральности нанотрубки  $(m, n)$  однозначным образом определяют ее структуру, в частности, ее диаметр  $d$ .

Исследования УНТ показали, что они обладают разнообразными электрическими свойствами [2, 3]. УНТ могут быть металлами ( $m = n$ ), узкозонными полупроводниками с шириной щели порядка нескольких сотых эВ ( $m - n = 3q$ , где  $q$  – целое;  $m \neq n$ ) или полупроводниками с шириной запрещенной зоны порядка 1 эВ (в остальных случаях) [3].

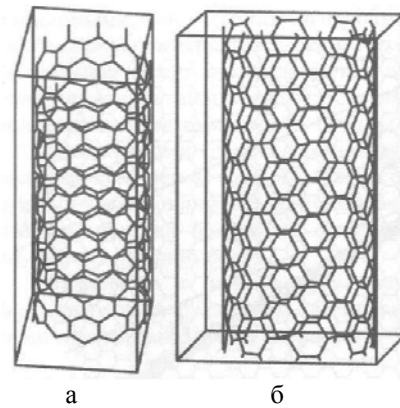


Рис.2. Примеры нанотрубок  
а – УНТ типа «зигзаг», б – УНТ типа «кресло»

Такие необычные электрические свойства нанотрубок делают их одним из основных материалов нанoeлектроники, прогресс в развитии которой является весьма существенным и, в частности, охватывает все аспекты создания антенных систем различного назначения. Значительный интерес представляет и исследование такого класса антенн, как наноректенн или иными словами наноразмерных ректенн (ректенна от английских слов **rectifying antenna** – антенна-выпрямитель), позволяющих эффективно решать ряд актуальных прикладных задач.

### 1. Области применения наноректенн

Рассмотрим возможные области применения и сформулируем дальнейшие пути развития наноректенн.

Одной из проблем в области нанотехнологий остается обеспечение электрического контакта нанoeлектронных устройств с макроскопическим уровнем без существенных потерь в потенциальной плотности тока, достижимой на наноуровне. Контакт со всеми нанотрубчатыми и нанопроводными устройствами реализуют посредством создания контактных площадок. Но так как, топологические размеры наносистем существенно меньше, чем разрешение современного литографического оборудования, то этот путь не эффективный для объединения множества наносистем. И относительно низкая плотность размещения контактных площадок перечеркивает достоинства возможной плотности упаковки нанoeлектронных элементов.

Вариант решения этой проблемы состоит в организации беспроводной связи с наноустройствами. При этом роль антенн могут выполнять УНТ.

По такому же принципу возможна организация электропитания наноустройств, с помощью наноректенн, в которых роль выпрямителей могут выполнять те же УНТ с внедренным дефектом атомной сетки.

Проблема энергетических неисчерпаемых ресурсов была и остается самой важной для человечества. Большой интерес всегда представляла солнечная энергетика. Ее привлекательность – это экономическая эффективность и экологическая чистота. Однако применение солнечной энергетики достаточно ограничено с одной стороны невысоким КПД солнечных батарей, основанных на обычных p-n переходах. Максимальный КПД типичных солнечных панелей не превышает 20%, хотя в мире и в том числе Украине (ГП НИТИП г. Харьков), ведутся

интенсивные работы по повышению КПД солнечных батарей за счет применения фотопреобразователей на основе многопереходных гетероструктур, а именно, трехпереходных фотопреобразователей с более высоким КПД (ориентировочно 27 – 30 %) и разработке конструктивных методов увеличения концентрации светового потока на фотопреобразователях [4]. С другой стороны эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую обусловлена временем суток и климатическими условиями.

Кардинального изменения технологии индустрии производства панелей для преобразования солнечной энергии следует ожидать в связи с развитием физики наноструктур (плазмонных проводов и углеродных нанотрубок). Указанные структуры могут стать основой для приемных фотоэлектрических антенн (наноректенн), преобразующих солнечный свет в постоянный ток. По многим параметрам наноректенны эффективнее традиционных фотопреобразователей и устраняют их недостатки, как с точки зрения эффективности преобразования (КПД 30-50%), так и с точки зрения себестоимости производства электроэнергии. Такой выигрыш в КПД связан возможностью преобразования энергии электромагнитных волн во всем спектре солнечного излучения.

Видимый свет и ИК-излучение дают наибольшую энергию: на видимый свет приходится 47 % лучистой энергии, на ИК – 44 %, а на ультрафиолет – только 9 % содержится в диапазоне длин волн от 0,4 мкм до 1,6 мкм (рис. 3).

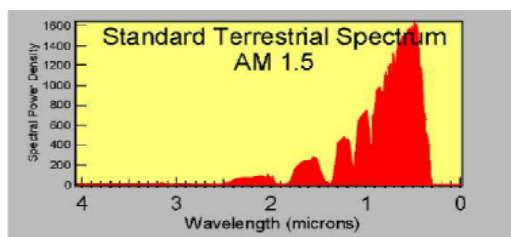


Рис. 3. Спектр солнечного излучения

Поэтому актуальными представляются разработки технологий, с помощью которых можно будет организовать сравнительно дешевое производство двухсторонних гибких солнечных панелей на основе наноректенн из УНТ. Одна сторона, которых работает в видимом диапазоне на длинах волн 0,43 – 0,50 мкм, где солнечный спектр имеет энергетический максимум, а другая в ИК-диапазоне (в том числе и в темное время суток). КПД таких панелей можно ожидать порядка 80 %. Отметим, что в настоящее время уже начаты эксперименты с тепловыми наноантеннами (наноректеннами ИК-диапазона) на углеродных нанотрубках [5].

Таким образом, благодаря развитию нанотехнологий солнечная энергетика обещает стать одним из основных источников энергетических ресурсов, следовательно, перспективы применения наноректенн для сбора солнечной энергии диктуют необходимость усовершенствования теории ректенн для случая терагерцового диапазона.

## 2. Постановка задачи исследований наноректенн

На кафедре основ радиотехники Харьковского национального университета радиоэлектроники разработана теория антенн с нелинейными элементами на базе которой, проведены теоретические и экспериментальные исследования ректенн. В монографии [6] изложены результаты исследований авторов по созданию теории и развитию практики построения крупноапертурных ректенн. Она содержит проверенные экспериментально методы анализа и оптимизации, с помощью которых исследованы функциональные возможности (включая предельные) крупноапертурных ректенн в составе систем беспроводной передачи энергии микроволновым лучом. Выявлены основные закономерности при приеме и преобразовании энергии сфокусированного микроволнового луча в постоянный ток. Полученные результаты применены для разработки принципов построения и новых технических решений эффективных ректенн микроволнового диапазона.

В дальнейшем авторами предполагается усовершенствовать разработанную теорию для анализа электродинамических и энергетических характеристик наноректенн.

В общем случае ректенна представляет собою нефазированную антенную решетку, состоящую из большого числа приемно-выпрямительных элементов (ПВЭ), каждый из которых в общем случае состоит (рис.4) из излучателя, выпрямителя, фильтра нижних частот (ФНЧ), фильтра постоянного тока (ФПТ) и нагрузки. Мощность с выходов всех ПВЭ суммируется схемой сбора мощности постоянного тока. Необходимо постоянное напряжение в нагрузке достигается параллельным и последовательным соединением ПВЭ в ректенной решетке.

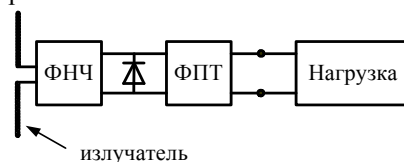


Рис. 4. Приемно-выпрямительный элемент ректенны

Параметры ректенн микроволнового диапазона принято оценивать такими характеристиками:

- КПД, который равен отношению мощности постоянного тока в нагрузке к максимальной СВЧ-мощности, извлекаемой приемно-выпрямительной апертурой из свободного пространства;
- удельной поверхностной мощностью (мощность постоянного тока, снимаемая с единицы площади апертуры ректенны);
- угловым распределением мощности побочного излучения на частотах гармоник, появление которого обусловлено наличием нелинейных элементов в ректенне.

Фокусировка электромагнитного излучения позволяет увеличить КПД перехвата энергии микроволнового луча апертурой ректенны [6,7]. Для случая ректенн оптического диапазона необходимо провести дополнительные исследования этого параметра и, в частности, рассмотреть возможности фокусировки оптического (солнечного) излучения на ректенне. Остальные же параметры ректенны можно масштабировать на оптический диапазон.

Далее обозначим некоторые подходы развития теории и техники наноректенн. Как показывает анализ результатов исследований, для дальнейшего развития в данной области необходимо решение следующих задач:

- более углубленное исследование процессов выпрямления оптического излучения в постоянный ток;
- разработка обобщенной математической модели, пригодной для анализа наноректенн;
- разработка методик и эффективных алгоритмов численной реализации математической модели, позволяющих проводить не только анализ, но и оптимизацию параметров наноректенн.

Построение математической модели наноректенн значительно упрощает и ускоряет теоретические исследования.

### 3. Обзор существующих вариантов реализаций нанодиодов

На первом этапе анализа наноректенн необходимо выработать критерий выбора выпрямительных диодов и придерживаясь методики анализа нелинейного режима ректенны [6] провести аппроксимацию его вольт-амперных характеристик. В результате можно сделать важный шаг – оценить потенциальные характеристики ПВЭ наноректенн.

Рассмотрим существующие в настоящее время варианты реализаций нанодиодов.

Комбинируя нанотрубки и снабжая их управляющими электродами, можно создавать разнообразные электронные наноприборы, в частности, углеродные нанодиоды.

Создание углеродных нанодиодов связано с использованием одной из характерных особенностей углеродных нанотрубок, которая заключается в возможности формирования в них локтевых соединений, которые образуются между нанотрубками кресельного и зигзажного типов и включает пятизвенное углеродное кольцо с внешней стороны локтя и семизвенное – с внутренней. Каждая часть такого соединения имеет различную ориентацию шес-тичленных углеродных колец по отношению к оси нанотрубки и, следовательно, отличается от другой, сопряженной с ней части, положением уровня Ферми, шириной запрещенных зон и проводящими свойствами.

На рис. 5 показана структура локтевого соединения нанотрубок. Слева относительно изгиба нанотрубка является металлической, в то время как справа – полупроводниковой. Таким образом, локтевое соединение нанотрубок представляет собой гетеропереход металл – полупроводник [8 – 13]. Так как, в разных частях локтевого соединения электроны на уровне Ферми обладают различной энергией, то электрический ток в таком соединении будет течь только в том случае, если электроны переходят из области соединения с большей энергией Ферми в область с меньшей энергией. В результате обеспечивается однонаправленное протекание тока.

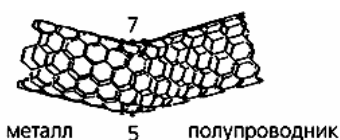


Рис. 5. Структура локтевого соединения нанотрубок

Односторонняя проводимость локтевого соединения нанотрубок используется для создания выпрямляющих нанодиодов. Нанотрубки находятся в контакте с на-нопроводниками из золота, нанесенными на кварцевую подложку. В зависимости от полярности напряжения электрический ток через устройство либо отсутствует, либо протекает при увеличении напряжения выше запорного. Вольт-амперная характеристика для такой системы – нелинейная [8] (рис. 6).

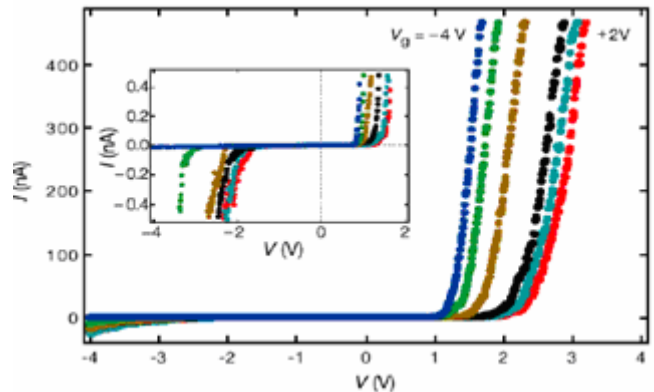


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика диода на изогнутой нанотрубке

Структурное моделирование и квантовомеханические расчеты предсказывают образование гетеропереходов и при других типах сращивания нанотрубок. Например, с помощью ободка из чередующихся углеродных пятиугольников и семиугольников можно соединить трубку типа «кресло» с нанотрубкой типа «зигзаг» [12, 13] без изгиба объединенной нанотрубки (рис. 7).

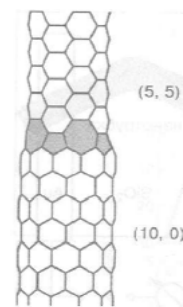


Рис. 7. Соединение нанотрубок типа «зигзаг» и «кресло»

В данном случае верхняя часть нанотрубки должна обладать металлическим, а нижняя – полупроводниковым типом проводимости, а вся система – свойствами нанодиода.

Различные типы ветвлений нанотрубок представляют интерес как структурные элементы объединения различных нанотрубок в сети и в качестве самостоятельных электронных устройств (резисторов, диодов).

Свойства Y-образного соединения нанотрубок («вилки» рис. 8) были первоначально предсказаны, а затем изучены экспериментально [14 – 16].



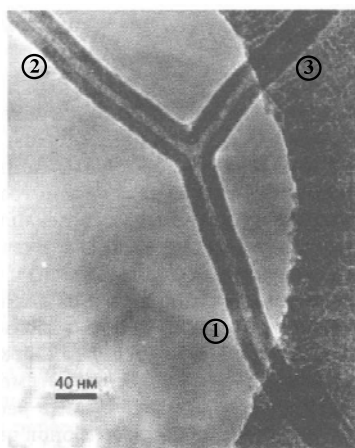


Рис. 8. Y-разветвление нанотрубок

При приложении отрицательного напряжения к плечу 1 такого соединения нанотрубок ток нарастает, а при положительном значении напряжения он вообще отсутствует – барьер из дефектов в структуре пропускает ток только в одну сторону. К одному из плеч, например 2, нановилки можно подать управляющее напряжение, влияющее на высоту барьера.

T-образное соединение нанотрубок согласно расчетам [17], (рис. 9) должно быть устойчиво при комнатной температуре и обладать свойствами гетероперехода металл-полупроводник-металл.

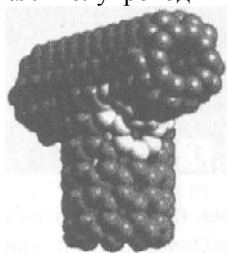


Рис. 9. Структурная модель T-образного разветвления

В работах [18 – 22] предложен выпрямляющий диод, основанный на межмолекулярном переносе заряда между нанотрубками (рис. 10). Такой нанодиод может быть более технологичным так как, для его создания не требуется выращивания нанотрубок необычной изогнутой или разветвленной геометрии.

При этом использовали две перекрещивающиеся одностенные нанотрубки, каждая из которых находится в контакте с двумя электродами (из сплава меди и золота) и со второй нанотрубкой. Верхняя нанотрубка свободно лежит на нижней. Благодаря Ван-дер-Ваальсову притяжению верхней нанотрубки к подложке и нижней нанотрубке, несмотря на малую площадь соприкосновения (порядка  $1 \text{ nm}^2$ ), в этой системе осуществляется хороший контакт между нанотрубками. При включении напряжения между электродами 1 и 1' или 2 и 2' можно определить электрические свойства индивидуальных нанотрубок, а при включении напряжения, например, между электродами 1 и 2 – свойства гетероперехода на пересекающихся нанотрубках.

Установлено, что при комнатной температуре гетеропереходы типа металл-металл и полупроводник-полупроводник обладают высокой проводимостью, практически совпадающей с проводимостью

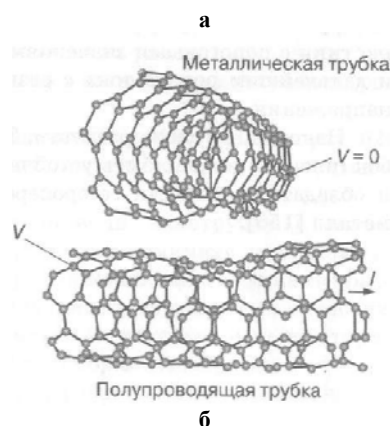
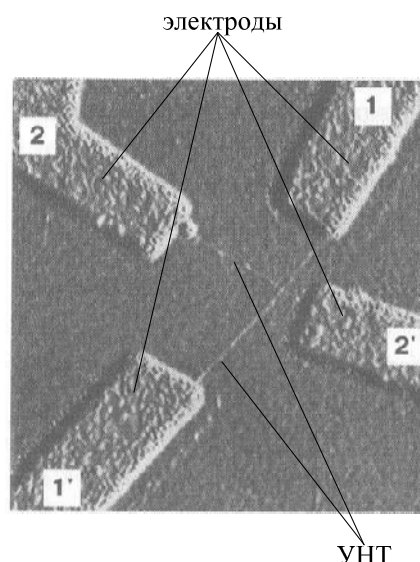


Рис. 10. а – две пересекающиеся нанотрубки в контакте с четырьмя электродами; б – структурная модель контакта между нанотрубками

индивидуальных нанотрубок, вольтамперная характеристика симметрична относительно изменения знака напряжения, и потому эффектов выпрямления не наблюдается. В случае контакта полупроводниковой и металлической нанотрубки, вследствие более значительного переноса заряда между нанотрубками и образования барьера Шоттки в области пересечения нанотрубок, проводимость системы резко падает (на два порядка), а вольтамперная характеристика асимметрична. При положительном потенциале  $V$  полупроводниковой нанотрубки с ростом абсолютной величины напряжения ток через гетеропереход полупроводник-металл возрастает быстрее, чем при отрицательном потенциале. (Наблюдаемый ненулевой ток при отрицательных значениях  $V$  связан с эффектами туннельного просачивания частиц через тонкий зазорный слой.)

В системе с пересечением металлической и полупроводниковой нанотрубок (см. рис. 10) на проводимость самой полупроводниковой нанотрубки оказывает очень сильное влияние барьер, образующийся в области контакта с металлической нанотрубкой. Варьированием потенциала металлической нанотрубки можно регулировать прямой и обратный ток через полупроводниковую нанотрубку.

На рис. 11 приведены зависимости тока через полупроводниковую (S) и металлическую (M) нанотрубки в случае, когда напряжение подается на один конец полупроводниковой нанотрубки, а второй ее конец и один конец металлической нанотрубки заземлены.

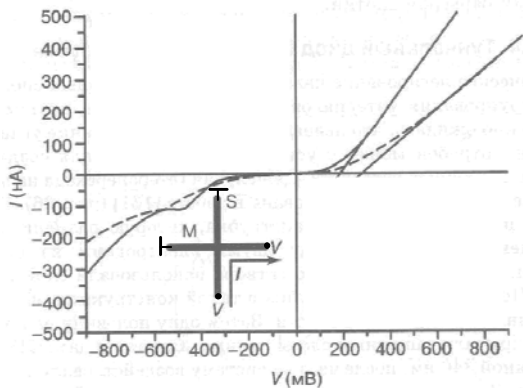


Рис. 11. Зависимость тока от напряжения смещения для двух гетеропереходов полупроводник-металл (сплошная и штриховая линии)

При отрицательных значениях  $V$  ток через полупроводниковую нанотрубку не протекает, так как при этом высота барьера Шоттки и ширина запирающего слоя возрастают. Подача положительного потенциала действует на барьер Шоттки и запирающий слой противоположным образом, и с ростом  $V$  ток через полупроводниковую нанотрубку быстро увеличивается. Таким образом, использование металлической нанотрубки в качестве третьего электрода позволяет создать нановыпрямитель на пересекающихся нанотрубках.

Химическое легирование является одним из основных способов конструирования материалов в микроэлектронике. Для случая гетероперехода на нанотрубке эта идея была реализована в работе [23]. На рис. 12 показана полупроводниковая нанотрубка на кварцевой подложке ( $\text{SiO}_2$ ) между двумя электродами из сплава  $\text{Ni}/\text{Au}$  – истоком (И) и стоком (С). В качестве обратного затвора использовался слой кремния (Si).

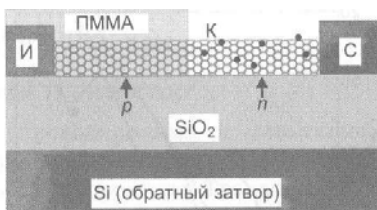


Рис. 12. Туннельный диод на легированной трубке

Первоначально нанотрубка в такой конструкции обладала дырочным типом проводимости. Затем одну половину нанотрубки покрывали защитным слоем полиметилметакрилата (ПММА) толщиной 340 нм, после чего на систему воздействовали парами калия. В результате адсорбции калия на открытой половине нанотрубки характер ее проводимости меняется с дырочного на электронный. Полученные в работе [23] ВАХ (рис. 13) указывают на эффекты выпрямления на таком элементе.

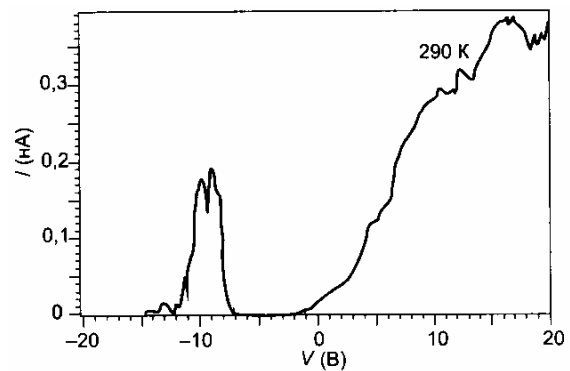


Рис. 13. Зависимость тока от потенциала управляющего электрода при напряжении смещения 1 мВ

Перспективными диодами в наноэлектронике и оптоэлектронике являются диоды на основе металл-диэлектрик-металл (МДМ) переходов. Например, в работах [24, 25] предполагается использовать МДМ-диоды для преобразования солнечного излучения в постоянный ток.

МДМ структуры состоят из двух металлических слоев, разделенных диэлектриком нанометрового размера (рис. 14).

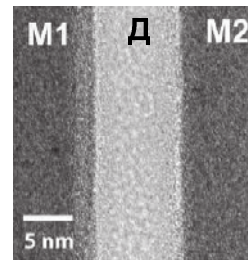


Рис. 14. Фотография МДМ нанодиода, выполненная с помощью просвечивающего электронного микроскопа

В качестве диэлектриков используются различные материалы, в том числе различные окисы [26, 27]. Для ректенн инфракрасного диапазона изоляционным материалом выступает оксид алюминия ( $\text{AlOx}$ ) [28]. Если использовать два различных металла для контактов, то выпрямление может быть достигнуто при нулевом смещении.

В работе [29] впервые разработан высокопроизводительный и экономически целесообразный метод для изготовления нескольких миллионов вертикальных МДМ нанодиодов за один цикл, которые имеют вид вольт-амперной характеристики приведенной на рис. 15.

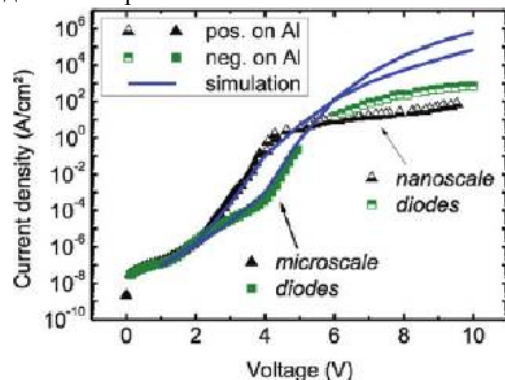


Рис. 15. Вольт-амперная характеристика МДМ нанодиода

Используя данный метод, был изготовлен массив МДМ стержневых диодов, состоящих из 4 миллионов диодов, каждый из которых имеет диаметр менее 100 нм.

Если представить нанодиод как конденсатор с параллельными пластинами, то его частота среза может быть рассчитана по формуле [29]:

$$f_{\text{ср}} = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{d}{2\pi R \epsilon_0 \epsilon_r S},$$

где  $R$  – это сопротивление подводящих линий, емкость  $C$  определяется площадью конденсатора  $S$  и толщиной диэлектрика  $d$ .

Таким образом, частотой среза можно варьировать путем изменения размера диода. Например, для нанодиода диаметром 93 нм частота отсечки получается 219 ТГц [29].

В настоящее время проводятся работы [29] по объединению массива МДМ диодов высокопроводящими углеродными нанотрубками, что позволит увеличить выпрямленную мощность.

### Выводы

На основании проведенного краткого обзора возможных в настоящее время реализаций нанодиодов, сформулируем требования, которые обуславливают применение их в наноректеннах:

- простота изготовления и повторяемость параметров диода от образца к образцу;
- стабильность параметров в широком диапазоне температур;
- возможность изготовления в едином технологическом цикле совместно с излучающими структурами и схемами сбора мощности постоянного тока.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Maksimenko S.A, Slepian G.Ya. // *The Handbook of Nanotechnology: Nanometer Structure Theory, Modeling, and Simulation*. 2004. P. 145.
2. Дьячков П.Н. *Электронные свойства и применения нанотрубок* / П.Н. Дьячков. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 488 с.
3. Дьячков П.Н. *Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применение*. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 293 с.
4. Замирец, Н.В. *Обоснование оптимальных конструктивно-технологических решений перспективных отечественных солнечных батарей* / Н.В. Замирец, В.Н. Борщев, А.М. Листратенко, В.А. Антонова, О.Н. Замерец Н.И. Слипченко, И.Т. Тымчук, Ю.А. Шовкопляс, И.Т. Перекопский // *Радиотехника. Всеукраинский межведомственный науч.-тех. сб.*, Харьк. нац. ун-т радиоэл.-ки. – Вып. 165.– X., 2011. – с. 161-168.
5. *Современные тенденции развития нанозлектромагнетизма: аналитический обзор* / НИУ «Ин-т ядерных проблем» БГУ. сост. Г.Я. Слепян, С.А. Максименко, П.П. Кужжир. – Минск: Изд. центр БГУ, 2012. – 71 с.
6. Шокало В.М., Лучанинов А.И., Рыбалко А.М., Грецих Д.В. *Крупноапертурные антенны-выпрямители систем беспроводной передачи энергии микроволновым лучом: Монография* / Под. ред. В.М. Шокало. Харьков: Коллегиум, 2006. – 310 с.
7. Гомозов А.В., Шокало В.М., Грецих Д.В., Аль-Самарай Ш.Ф.А. *Возможность реализации системы беспроводной передачи энергии к труднодоступным объектам на многопозиционной системе с фокусировкой излучения и ректенне* / *Интегрированные информационные*

*радиоэлектронные системы и технологи: сб. науч. тр. 4-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». 18-21 октября 2011 г. Ак-я прикл. радиоэл.-ки, Харьк. нац. ун-т радиоэл.-ки. – Том I. Часть 1. – Харьков: ХНУРЭ, 2011. – С. 365-370.*

8. Z. Yao, H.W. Ch. Postma, L. Balents, C. Dekker. *Carbon nanotube intramolecular junctions*. *Nature (London)*, 402, 273-276 (1999).
9. Y. Zhang, T. Ichihashi, E. Landree, F. Nihey, S. Iijima. *Heterostructures of single-walled carbon nanotubes and carbide nanorods*. *Science* 285, 1719 (1999).
10. L. Chico, V.H. Crespi, L.X. Benedict, S.G. Louie, M.L. Cohen. *Pure carbon nanoscale devices: nanotube heterojunctions*. *Phys. Rev. Lett.*, 76, 6, 971-974 (1997).
11. M. Menon, D.S. Srivastava. *Carbon nanotube based molecular electronic devices*. *J. Mater. Res.*, 13, 9, 2357-2361 (2001).
12. A. Rochefort, P. Avouris. *Quantum size effects in carbon nanotube intramolecular junctions*. *Nano Lett.* 2, 3, 253-256 (2002).
13. J. Yi, G. Cuniberti, M. Porto. *Modeling of carbon-based nanojunctions*, In: *Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology*, ed. by H. S. Nalwa. *Amer. Sci. Publ.*, v. 4, 607-617 (2004).
14. L. Venema. *Nanotechnology: crossroads in carbon*. *Nature (London)* 407, 959 (2000).
15. A. Rochefort and P. Avouris. *Quantum size effects in carbon nanotube intramolecular junctions*. *Nano Lett.* 2, 3, 253-256 (2002).
16. B.C. Shatiskumar, P.J. Tomas, A. Govindaraj, C.N.R. Rao. *Y-Junction carbon nanotubes*. *Appl. Phys. Lett.*, 77, 16, 2530-2532 (2000).
17. J. Liu, M.J. Casavant, M. Cox, D.A. Walters, P. Boul, W. Lu, A.J. Rimerberg, K.A. Smith, D.T. Colbert, R.E. Smalley. *Controlled deposition of individual SW carbon NT on chemically fictionalized templates*. *Chem. Phys. Lett.*, 303, 125 (1999).
18. M. Menon, D.S. Srivastava. *Carbon Nanotube «T Junctions»: Nanoscale metal-semiconductor-metal contact devices*. *Phys. Rev. Lett.*, 79, 22, 4453-4456 (1997).
19. M.S. Fuhrer, J. Nygerd, L. Shih, M. Forero, Y.-G. Yoon, M.S.C. Mazzoni, H.J. Choi, J. Ihm, S.J. Louie, A. Zettl, P.L. McEuen. *Crossed nanotube junction*. *Science*, 288, 494-497 (2000).
20. M.S. Fuhrer, Andrew K.L. Lim, L. Shih, U. Varadarajan, A. Zettl, Paul L. McEuen. *Transport through crossed nanotubes*. *Physics E*, 6, 868-871 (2000).
21. J.W. Janssen, S.G. Lemay, L.P. Kouwenhoven, C. Dekker. *Scanning tunneling spectroscopy on crossed carbon nanotubes*. *Phys. Rev. B*, 65, 115423 (2002).
22. J.W. Park, J. Kim, K.-H. Yooa, *Electrical transport through crossed carbon nanotube junctions*. *J. Appl. Phys.*, 93, 7, 4191 (2003).
23. C. Zhou, J. Kong, E. Yenilmez, et al. *Modulated chemical doping of individual carbon nanotubes*. *Science*, 290, 1552 (2000).
24. L. Novotny, N. van Hulst. *Antennas for Light*. *Nat. Photon*. 2011, 5, 83-90.
25. S. Grover, G. Moddel. *Engineering the Current Voltage Characteristics of Metal-Insulator Metal Diodes Using Double-Insulator Tunnel Barriers*. *Solid-State Electron*. 2012, 67, 94-99.
26. G. Jegert, A. Kersch, W. Weinreich, P. Lugli. *Monte Carlo Simulation of Leakage Currents in TiN/ZrO2/TiN Capacitors*. *IEEE Trans. Electron Devices* 2011, 58, 327-334.
27. P. Periasamy, J.J. Berry, A.A. Dameron, J.D. Bergeson, D.S. Ginley, R. P. O'Hayre, P.A. Parilla. *Fabrication and Characterization of MIM Diodes Based on Nb/Nb2O5 via a Rapid Screening Technique*. *Adv. Mater.* 2011, 23, 3080-3085.
28. J.A. Bean, A. Weeks, G.D. Boreman. *Performance Optimization of Antenna-Coupled Al/AIOx/Pt Tunnel Diode Infrared Detectors*. *IEEE J. Quantum Electron*. 2011, 47, 126-135.
29. M. Bareib, F. Ante et al. *High-Yield Transfer Printing of Metal Insulator Metal Nanodiodes*. *ACS Nano*, 2012, 6 (3), pp 2853-2859.