

На правах рукописи



**Али Аббас Мохсин Али**

**Исследование структурных превращений нанокластерных элементов  
радиоустройств и организации технологии их защиты от радиации**

Специальность 05.12.04 -  
Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Владимир - 2016 г.

Работа выполнена на кафедре радиотехники и радиосистем «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ).

Научный руководитель:

**Никитин Олег Рафаилович**

доктор технических наук, заслуженный  
деятель науки РФ, профессор,  
заведующий кафедрой радиотехники и  
радиосистем ВлГУ, г. Владимир

Официальные оппоненты:

**Печерская Екатерина Анатольевна**

доктор технических наук, доцент  
кафедры «Нано- и микроэлектроника»  
Пензенский государственный  
университет, г. Пенза

**Осин Алексей Викторович**

кандидат технических наук, заместитель  
главного конструктора ООО  
«РУСАЛОКС», г. Владимир

Ведущая организация:

ОАО «Владимирское КБ радиосвязи».

Защита диссертации состоится «07 » апреля 2016 г. в 14:00 ч. на заседании диссертационного совета Д212.025.04 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, корп. 3, ФРЭМТ, ауд. 301-3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых и на сайте <http://diss.vlsu.ru>.

Автореферат разослан « 05 » февраля 2016 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: ул. Горького, д. 87, ВлГУ, ФРЭМТ, г. Владимир, 600000

Учёный секретарь  
диссертационного совета д.т.н., профессор

А.Г. Самойлов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы и состояние проблемы.** Тема диссертации «Исследование структурных превращений нанокластерных элементов радиоустройств и организации технологии их защиты в условиях радиации».

По мере развития радиотехнических устройств, в т.ч. систем микро- и наноэлектроники и средств защиты от радиации, остро встает вопрос о миниатюризации электронных схем путем перехода к наноразмерам и увеличении объемов передаваемой информации. При решении этих задач необходимо учитывать автоматически возрастающую опасность отказов работы систем радиоустройств из-за дефектов, которые проявляются на микроуровне и не носят катастрофического характера, но на наноуровне могут возрасти многократно. Это относится к дефектам, образующимся в условиях повышенной радиации. Особенно чувствительными оказались системы связи бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА) на космических аппаратах (КА). Образовавшийся при взрыве искусственный радиационный пояс Земли (ИРПЗ) привел к резкому увеличению потоков электронов на два порядка. При этом уровень радиационной стойкости электронной аппаратуры КА, определенный по результатам испытаний, составлял 0,6–2 Мрад. Этот искусственный радиационный пояс Земли, явился причиной потери семи спутников.

Отечественные научные школы, занимающиеся проблемами проектирования и моделирования компонентов радиосетей на наноуровне, представлены рядом научных коллективов (ФТИ РАН, МИЭТ, Москва, НГТУ, Новосибирск) и др.. Проблемам радиационной устойчивости радиосистем микроэлектроники посвящены работы Катунина Ю. и Стенина В., С. Полесского, В. Жданова (ИППМ РАН) и др. В то же время, программы конференций и докладов по нанотехнологии, в нашей стране не содержат тематики защиты радиосистем от радиации.

В ВлГУ на кафедре радиотехники группой ученых начаты исследования радиационных эффектов, происходящих в элементах радиосистем (сверхрешетках, кольцах, кластерах) при их проектировании на наноуровне.

Продолжение этих исследований в представленной диссертационной работе.

Применение полупроводниковых изделий микроэлектроники в качестве компонентной базы космических систем сделало актуальной задачу оценки и прогнозирования устойчивости компонентов и узлов к радиационным воздействиям космического пространства и создания средств защиты. Тем более, что увеличение сроков пребывания в космическом пространстве и переход к наноэлектронике значительно усугубляют проблему. К теме данной работы относятся и нерешенные вопросы создания защиты электронных устройств. Состояние проблемы определяется несколькими причинами. Основными из них являются: сложность постановки реальных экспериментов; отсутствие теории для моделирования (и проектирования) электронных систем на наноуровне; отсутствие базы данных по нанокластерам; существование дефицита компьютерных программ расчета моделей нанокластеров, используемых в радиотехнике; почти полное отсутствие реального проектирования радиосистем на наноуровне, за исключением фиксации необходимых свойств материалов, которые исследуются в нанотехнологии; не изучены радиационные превращения нанокластеров и не разработаны методы защиты.

#### **Цель и задачи исследования.**

Целью диссертационной работы является исследование структурных превращений модельных нанокластерных элементов радиоустройств и создания защиты в условиях радиации.

Основными задачами исследования являются:

1. Анализ проблем, возникающих при переходе радиоэлектронных устройств (РЭУ) на наноуровень.
2. Создание основы той части теоретической радиотехники, которая необходима для моделирования (и проектирования) РЭУ на наноуровне. Для чего, исследовать вопросы комбинаторики и симметрии нульмерных нанокластеров, одномерных замкнутых циклов, двумерных (слоистых) и 3D - гетероструктур, как связанных элементов радиосхем.
3. Проведение серии компьютерных экспериментов по расчету модельных нанокластеров с использованием программы «Компьютерный наноскоп» для отработки методики проектирования сборки элементов радиотехнических устройств.

4. Исследование на моделях нанокластеров радиационных эффектов, приводящих к перестройке их структуры, для чего создать необходимую базу данных по нанокластерам веществ, применяемых в радиотехнике, которые связаны с возможными радиационными превращениями.
5. Разработка методики компьютерного расчета реальных и модельных нанокластеров для проектирования устройства защиты радиосистем на наноуровне, используя программу многоцентровой задачи роста структур.
6. Разработка организационной структуры технологии сборки общей системы защиты радиотехнических устройств на наноуровне.

**Методы исследования.** Используемые в работе методы и подходы базируются на математической теории разбиений пространства, теории групп симметрии, комбинаторике, теории радиоэлектроники, наноэлектроники и кристаллографии. В работе используется, расширенный подпрограммой многоцентрового роста нанокластеров, комплекс программ «Компьютерный наноскоп», разработанный в ВлГУ.

**Достоверность** результатов исследования основывается на фундаментальных принципах радиофизики и наноэлектроники. Результаты расчетов коррелируют с известной научной информацией наблюдений структур нанообъектов в электронной микроскопии.

**Объектом исследований** является система защиты устройств микро- и наноэлектроники, работающих в условиях повышенной радиации.

**Предметом исследования** являются методы компьютерного моделирования нанокластеров и гетероструктур для наноэлектроники, их радиационные превращения и методика использования программ компьютерной сборки устройства радиационной защиты радиотехнической аппаратуры на наноуровне.

#### **Научная новизна исследования**

1. Разработана методика проектирования гетероструктуры защитного слоя наноэлементов радиоустройств методом согласования слоев, выполняющих различные функции.
2. Создана база данных по нанокластерам, используемым в радиотехнических устройствах наноэлектроники.
3. Предложена классификация одномерных (колец) и двумерных (слоев) гетероструктур на основе теории групп симметрии.

4. Введено понятие и произведен расчет нанополикластерной системы элементов радиотехнических устройств.

#### **Практическая значимость исследования**

1. Проведенные исследования составляют методологическую основу проектирования радиотехнических средств защиты микро-и нанoeлектронных устройств, работающих в условиях радиационного излучения.
2. Методика моделирования гетероструктур позволяет предложить методику прогнозирования их свойств на основе теории групп симметрии путем расчета большого числа вариантов сборки реальных систем, что сокращает время расчета в 5-6 раз.
3. База данных по моделям нанокластеров может быть использована на этапе проектирования и сборки наноустройств с широким спектром применения.
4. Весогабаритные параметры защитной системы уменьшаются по сравнению с обычным вариантом в 9-10 раз, кроме того предлагаемый вариант более технологичен.

#### **Результаты исследования**

1. Включены в учебный процесс по направлению 05.12.04 – «Радиотехника, в т.ч. системы и устройства телевидения» в ВлГУ.
2. Включены в учебное пособие для студентов Вузов, обучающихся по направлению «радиотехника».
3. Включены в перспективный план работ ОАО ВКБР.

#### **Апробация работы и публикации**

На всероссийской научно-практической конференции «XI Столетовские чтения», Владимир, 2014. По теме исследования опубликовано 7 работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК, издано 1 учебное пособие.

**Личный вклад автора.** Положения, выносимые на защиту, разработаны автором самостоятельно в ходе выполнения научно-исследовательских работ на кафедрах основ нанотехнологии и теоретической физики (до 2013г.) и «Радиотехники и радиосистем» Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения.

## **Основные положения и результаты, выносимые на защиту**

1. Методика перечисления и классификации циклических и слоистых наноструктур, используемых в радиотехнике, на основе теории конечных групп симметрии.
2. Методика расчета и проведения компьютерных экспериментов по созданию циклических и слоистых гетероструктур для радиоэлектроники.
3. Методика расчета радиоактивных превращений вещества нанокластеров, используемых в радиоэлектронике.
4. Проект технологии создания гетероструктуры защитного слоя для радиоэлектроники, работающей в условиях радиации.
5. Расчет нанополикластерной системы в программе многоцентрового роста структур.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приводится обоснование актуальности темы диссертации, сформулирована научная новизна, отмечена практическая значимость результатов работы, определены цели и задачи исследования, изложена структура работы, перечислены новые результаты и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрено состояние области исследования, произведен обзор и анализ научной литературы по аспектам, связанным с проблемами перехода элементной базы радиосистем на микро- и наноуровень. Отмечена сложность решения проблемы защиты радиоустройств, работающих в условиях повышенного радиационного фона. Произведен анализ моделирующих программных средств и дана оценка возможностей их применения при проектировании радиотехнических элементов микро- и наноэлектронных устройств защиты от радиации.

Основными источниками ИИ в космическом пространстве являются: электроны и протоны радиационных поясов Земли (ЕРПЗ); солнечные космические лучи (СКЛ); галактические космические лучи (ГКЛ).

В околоземном и межпланетном пространствах КА подвергаются воздействию разнообразных факторов космоса. Ионизирующее излучение (ИИ) состоит из потока первичных заряженных частиц (электроны, протоны и тяжелые заряженные частицы), а также вторичных частиц — продуктов ядерных превращений, связанных с первичными частицами. Основные

эффекты воздействия ИИ на БРЭА обусловлены ионизационными и ядерными потерями энергии первичных и вторичных частиц в чувствительных объемах элементов ИС. Эти эффекты проявляются через: параметрические отказы бортовой радиоэлектронной аппаратуры вследствие деградации характеристик ИС по мере накопления дозы ИИ; сбои и отказы ИС от воздействия отдельных высокоэнергетических ядерных и элементарных частиц. Изучение опубликованных в открытой печати данных позволило определить основные направления исследований, составивших цель работы, произвести выбор математического аппарата, основанного на использовании теории групп симметрии, предложить новые пути применения существующих программных средств и создать методику решения задач расчета нанокластеров и гетероструктур, которые используются в нанoeлектронике. Радиационные данные и основные ядерные реакции химических элементов, опубликованные в таблицах и открытой печати, позволили выбрать информацию для анализа радиационных превращений нанокластеров, составляющих основу гетероструктур в схемах радиационной защиты. Наиболее актуальными задачами являются исследования электронных приборов, работающих в космическом пространстве (КП).

**Во второй главе** рассмотрены модели и методы исследования наносистем.

В ряде работ отмечено, что методы классического расчета радиосхем не применимы к радиоустройствам на наноуровне, для которых понятие цепи, проводимости, «узла», емкости и других элементов резко меняют свое содержание. В частности, при переходе в радиосхемах с макро- на микро-, а затем на наноуровень новое содержание и важное значение приобретает классическая модель кольца (одномерного цикла). Например, (рисунок 1а) простую схему, для необходимых расчетов, можно заменять модельной системой сопряженных замкнутых цепей, циклов (колец) (рисунок 1б.), топологически эквивалентных представленной схеме и исследовать теоретически либо реально собирать циклы в отдельности. Теоретически, каждая фиксированная «цветная» точка кольца (рисунок 1б) определяет функцию элемента цепи (резистора, конденсатора, источника, детектора, транзистора и др.) но, одновременно, соответствует выбранному веществу

(проводнику, диэлектрику и прочее), то есть несет определенную «нагрузку». В квантовой физике, на атомарном уровне, такую модель называют кольцом Ааронова-Бома. Обозначения в кольце: К-контакт, R-резистор, D-детектор, E-источник, С-конденсатор

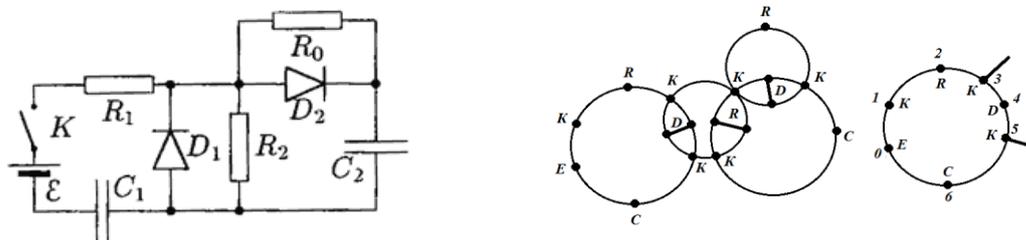


Рисунок 1. Пример элементарной электрической цепи (а) и ее представление в циклах (б), где выделено одно кольцо (справа).

Для перечисления разбиений  $N_v^k$  заданного периода  $v$ , содержащего  $k$  – занятых позиций точек (один цвет) и не занятых  $(v - k)$  – точек (другой цвет), использовались комбинаторные методы теории чисел. Рау В.Г. и др. было показано, что каждой блок-схеме с автоморфизмом  $\alpha : a_{ij} + 1 \rightarrow a_{i+1,j}$ ;  $V_{i,k} \rightarrow V_{i+1,k}$ , переставляющим как элементы  $a_{ij}$ , так и блоки  $V_{i,k}$  блок-схемы по циклу длины  $v$ , соответствует один и только один циклический набор, а поэтому число блок-схем из множества  $E = \{0, 1, \dots, v - 1\}$  с  $|E| = v$  равно

числу циклических разбиений  $N_v^k = \frac{1}{k} \sum_{d|n} \phi(d) C_{\frac{v}{d}}^{\frac{k}{d}-1}$ , где  $\phi(d)$  - есть

функция Эйлера, которая определяет количество чисел взаимно простых с  $d$ . На следующем этапе исследований цветных колец, как и в случае с двухцветными наборами точек, в диссертации впервые предложен способ расчета структур многоцветных (в том числе и двухцветных) циклических разбиений и способ их классификации на основе теории симметрии групп подстановок. Из теории групп известно, что  $N!$  перестановок  $N$  чисел составляет их наибольшее количество и принадлежит полной группе симметрии перестановок чисел. Полная группа разбивается на подгруппы порядка  $p$ . Элемент подгруппы (перестановка) будет соответствовать определенной структуре кольца, если каждому числу на кольце однозначно поставить в соответствие число в перестановке. В то же время, каждой перестановке соответствует один элемент подгруппы, который можно представить в виде произведения подциклов. Считая точки, принадлежащие

одному подциклу идентичными, то есть имеющими один и тот же цвет, получаем разбиение перестановки на цветные подциклы. Каждая подгруппа, содержащая  $p$  – элементов (порядок группы) определит количество структур колец с общей симметрией. Таким образом, получаем возможность для классификации структур колец по их принадлежности к одной подгруппе, а цветные подциклы в подстановке определяют структуру цветного кольца. Для вывода преобразований симметрии подгруппы подстановок и построения групповой таблицы Кэли нами была составлена программа перемножения элементов группы, возможности которой представлены на рисунок 2.

$g[0]=(0\ 1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 6\ 7)$ ;  
 $g[1]=(5\ 4\ 7\ 6\ 0\ 1\ 2\ 3)$ ;  
 $g[2]=(1\ 0\ 3\ 2\ 5\ 4\ 7\ 6)$ ;  
 $g[3]=(4\ 5\ 6\ 7\ 1\ 0\ 3\ 2)$ ;  
 $g[4]=(6\ 7\ 5\ 4\ 2\ 3\ 1\ 0)$ ;  
 $g[5]=(3\ 2\ 0\ 1\ 6\ 7\ 5\ 4)$ ;  
 $g[6]=(7\ 6\ 4\ 5\ 3\ 2\ 0\ 1)$ ;  
 $g[7]=(2\ 3\ 1\ 0\ 7\ 6\ 4\ 5)$ ;

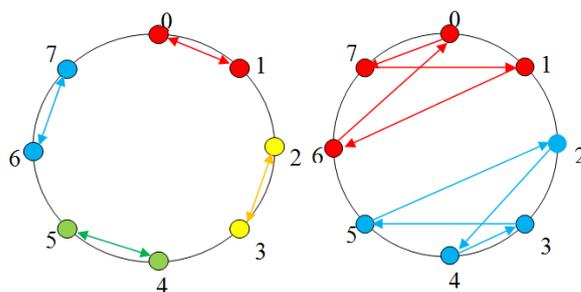


Рисунок 2. Группа из 8 элементов и пример двух цветных колец для операций перестановки этой группы  $g[2]$  и  $g[6]$ .

Способ двумерной «визуализации» результатов расчета по данной программе и ее расширении для изображения операций группы методом разбиения плоскости на полимино. напрямую выводит на способ проектирования решеточной структуры различными нанокластерами.

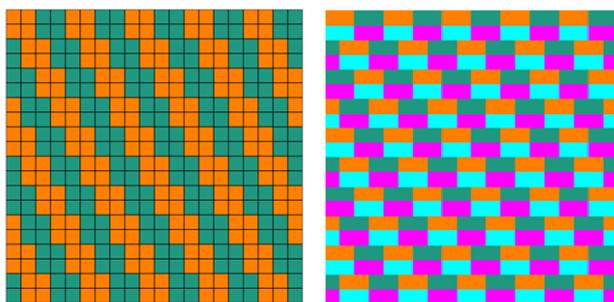


Рисунок 3. Проекты сверхрешеток для сборки гетероструктур.

В данном случае 8 позиций для нанокластеров (8 цифр в строке подстановки) могут располагаться таким образом, что их последовательность определяет один из вариантов гетероструктуры, представленный в конкретной группе подстановок по рисунок 2. Пример приведен на рисунок 3.

Перебор вариантов с учетом симметрии разбивает структуры на классы эквивалентности, количество которых определяется числом делителей числа ячеек  $N$  элементарного разбиения. Поэтому сокращение расчетов при проектировании гетерослоев оценивается коэффициентом  $K = N!/\sum d_N$ , где  $d_N$  – делитель  $N$ . Для  $N$  – простого числа, величина  $K = N!/(N+1)$ .

При сборке наноструктуры полученная информация позволит создавать на поверхности материала необходимые элементы радиосхем, выбирая в качестве вариантов рассчитанные геометрические параметры сверхрешеток.

В работе рассматривается *расширенный вариант перебора решеток* на основе различных упаковочных пространств, считая переход от одной решетки к другой (с тем же объемом) деформационным. (рисунок 4).

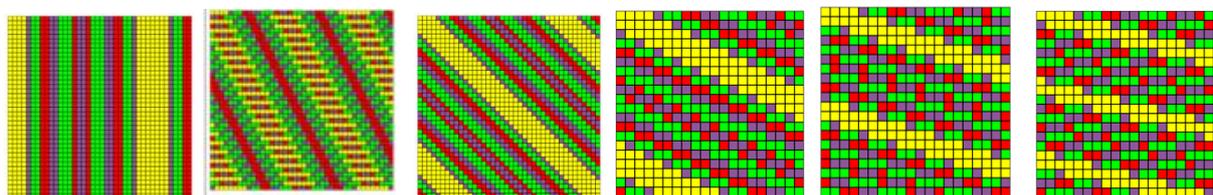


Рисунок 4. Действие на структуру дискретных деформационных преобразований

Таким образом, мы имеем набор сверхрешеток для проектирования слоистой гетероструктуры. В этом случае, нет необходимости подбирать слои по принципу их согласования, так как они имеют общую основу и все «укладываются» на одну и ту же фундаментальную решетку – дискретное целочисленное пространство. Количество решеток  $N_{PS}$ , соизмеримых друг с другом, содержащих  $Z$  элементов, теоретически определяется по формуле:  $N_{PS} = \sum_Z d_Z$ , что означает сумму делителей числа  $Z$ .

**Третья глава работы** посвящена разработке методики построения элементов гетероструктуры защитного устройства радиотехнических систем, работающих в условиях повышенного радиационного фона. Методика содержит последовательность действий и методологию сборки гетероструктуры. Первый этап – **подготовительный**, в рамках которого рассматривается первичная схема защиты и расчет структуры нанокластеров до и после радиационного превращения. В качестве основы проектируемого устройства предлагается пористая структура анодированного оксида алюминия  $Al_2O_3$ . Предварительные исследования структуры поверхности пористого оксида алюминия и его кластерная модель были проведены при участии автора в экспериментальной лаборатории ВлГУ (рисунок 5).

Дифрактограмма рентгеновского фазового анализа образцов пористой поверхности  $Al_2O_3$  (дифрактометр D8 ADVANCE фирмы «Bruker») показала, что мы имеем дело с твердой гелевой или аморфной структурой анодированного оксида алюминия (АОА). Этот факт явился еще одним подтверждением в правильности выбора материала для радиационной защиты, так как при ядерных процессах в кристаллах могут возникать резонансные фотон-фононные взаимодействия, разрушающие материалы. В квантовой теории оправдано предположение, что фонный спектр в гелевой структуре широкополосный и будет носить характер «белого шума».

Существенная выгода при использовании относительно «легкой» основы по сравнению со свинцовой защитой очевидна. Защита всего блока электроники («зонтик»), а не отдельных его частей, также может дать существенную конструкционную выгоду в применении слоистой гетероструктуры. Наконец, можно специально подобрать такие энергетические барьеры поглощения ядрами защиты протонов, которые в условиях космического пространства будут оптимальными.

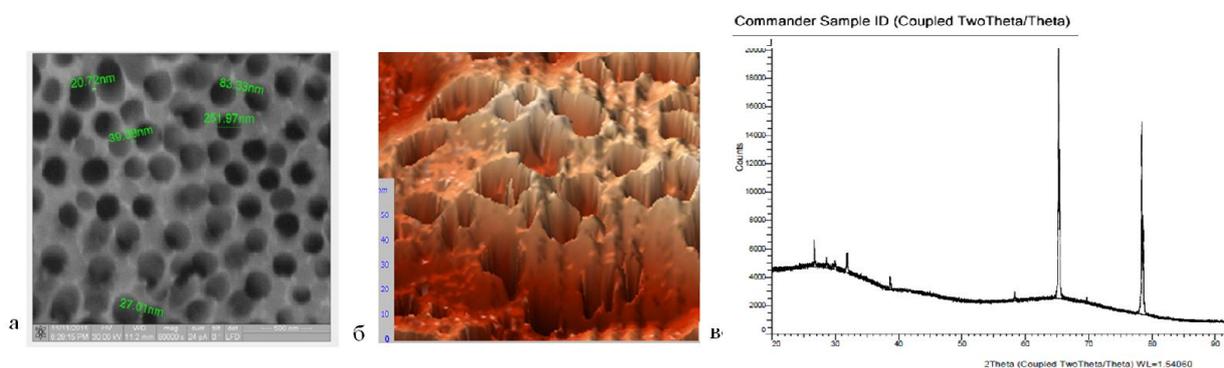


Рисунок 5. Электронная микроскопия образцов анодированного оксида алюминия: (а) – растровый электронный микроскоп, (б) – атомносиловой микроскоп, (в)- дифрактограмма исследуемого образца оксида алюминия

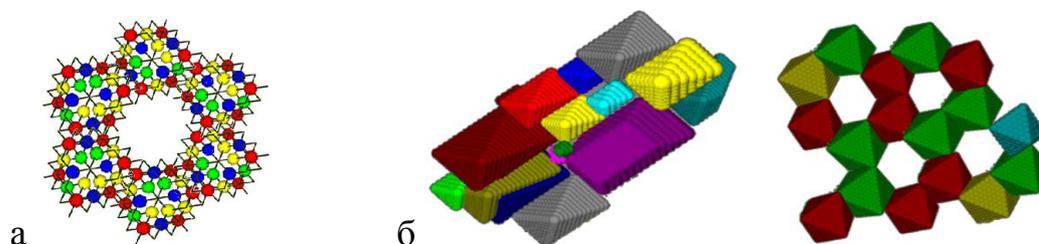


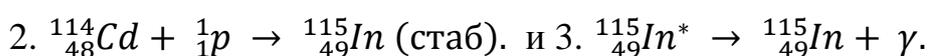
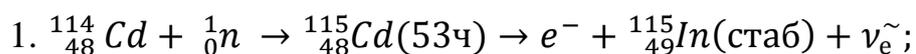
Рисунок 6. Сборка пористой структуры  $(Al_2O_3)_n$  в «Компьютерном наноскопе»: сборка фрагмента монопористой структуры (а) на основе координационных связей и (б) слоистой и пористой структуры на основе расчета по программе многоцентрового роста

Аналогичные проблемы решаются в настоящее время в нанoeлектронике. В частности, для увеличения быстродействия (уменьшения времени задержки, определяемой величиной  $RC$  – канала) КМОП – структур используются два технологических приема: (1) формирование структуры *кремний на изоляторе* (КНИ) и (2) *многоуровневое межсоединение элементов* интегральных схем. Ключом к достижению высокой плотности низлежащих уровней является *планарная технология*. Заложена идея расположения межсоединений в последовательных слоях друг над другом. Средние размеры устройств составляют величину до 100нм.

Использование КНИ-структур резко уменьшает  $RC$  –элементов, а следовательно, и время задержки. В 1997 году фирма IBM опубликовала результаты исследований по созданию транзистора с длиной канала 70 нм со временем задержки 7,9 пс при комнатной температуре. Опытная эквивалентная схема полевого транзистора приведена в диссертации.

Сопротивления и емкости определяются размерами и расположением отдельных элементов транзистора и, особенно, теми материалами, из которых они изготовлены. В эти элементы входят: канал, металлическая разводка, затвор, р-п – переходы истока и стока, затвор и подзатворный диэлектрик. Для п-канала используют металлы титан Ti, цирконий Zr, гафний Hf, таллий Ta(с работой выхода около 4эВ), для р-канала нитриды таллия TaN, вольфрама WN и металлы никель Ni, платина Pt (работа выхода около 5,2 эВ). Для ослабления нежелательных туннельных токов через диэлектрик конденсатора, обычно используется диэлектрик с большой диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Но при этом такие диэлектрики вступают в реакцию с кремнием, что приводит к деградации границы раздела диэлектрик-полупроводник. В этом случае первый слой, контакта с кремнием был либо оксидом кремния  $SiO_2$ , либо нитридом окиси кремния  $SiO_xN_y$ . Кроме этого, при работе устройства и повышении температуры многие диэлектрики из поликристаллического (поликластерного хаотического) состояния переходят в кристаллическое (монокластерное направленное) состояние. Каким образом, и с какими веществами происходят фазовые переходы, требует длительных экспериментальных исследований. Предложено на стадии проектирования радиосхемы заменить реальный эксперимент на компьютерный, адаптировать программы в двух

вариантах: (1) вариант направленного роста и (2) вариант ненаправленного роста. В нанотехнологии существует достаточное количество экспериментов, подтверждающих технологическую возможность заполнения пор АОА различными кластерами, поэтому для выбора конструкции защитного экрана рассмотрим вначале радиационную составляющую процессов, и их последовательность. В качестве примера выберем стабильный изотоп кадмия-114 (с распространенностью 28,7%), поглощающий как нейтроны, так и протоны в соответствии с приведенными ниже реакциями (1) и (2):



Очевидно что, как в первой реакции, так и во второй при достаточных радиационных потоках или накоплении их во времени должно происходить радиационное превращение кластеров кадмия в кластеры стабильного индия. При поглощении ядрами кадмия высокоэнергетических нуклонов (протонов или нейтронов) у образовавшегося возбужденного ядра индия (3-я строка реакций) возможно (с 95% вероятностью) испускание  $\gamma$ -фотона через 4,5 часа. Для поглощения промежуточных фотонов, возникающих как побочный продукт реакции, а также электронов с большой энергией (в первой реакции), понадобится дополнительный экран и вся защитная «рубашка» превратится в многослойную гетероструктуру (рисунок 7).

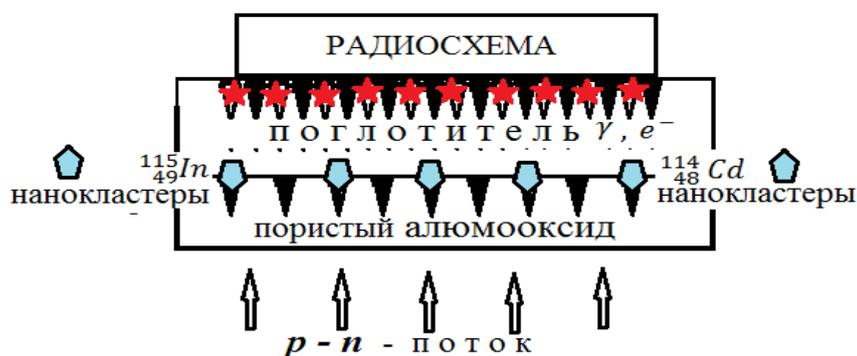


Рисунок 7. Гетероструктура слоев «защитного экрана» для радиосхем, работающих в условиях радиации.

Основная техническая задача первого этапа при проектировании защитного экрана заключается в подборе элементов, превращающих потоки

высокоэнергетических ядерных частиц: электронов, протонов, и нейтронов, в возбужденные ядра первого нанокластерного слоя, испускающие фотоны высоких энергий и, которые, в свою очередь, будут поглощены микро-, нанослоем однородного вещества следующего слоя - поглотителя. Тем самым, радиосхема окажется защищенной. Второй этап – **расчетный**, содержит последовательность шагов по расчету структур нанокластеров: (1) проводится анализ твердотельного состояния вещества по данным рентгеновского структурного анализа (РСА); (2) определяются координационные связи атомов (молекул) в кристалле; (3) строится модель послойного роста кластера в программе «Компьютерный наноскоп»; (4) проводится анализ размеров и поверхностных связей структуры кластера для проведения «сборки» гетероструктуры. Третий этап – **экспериментальный**, который содержит ту же последовательность операций второго этапа с анализом структуры нанокластера, образовавшегося после радиационного превращения и его поверхностных связей, а так же модельные компьютерные эксперименты по расчету отдельных нанокластеров, их верификации, сборке колец и гетерослоев методом «многоцентровой задачи» роста. Гетерослои алюминия оксида с кластерами кадмия-114 (до радиационного воздействия) и индия-115 (после воздействия) показаны на рисунке 8.

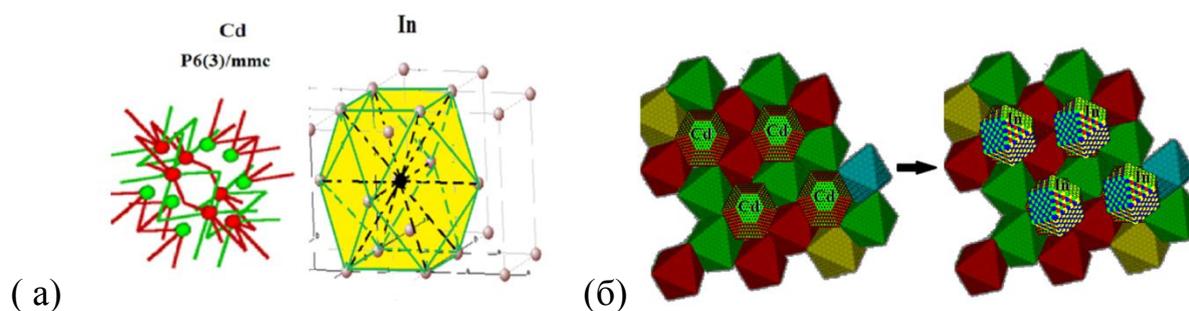


Рисунок 8. Атомарные нанокластеры Cd-114 и In-115 (а); гетерослой  $Al_2O_3+(Cd \rightarrow In)$  (б) в компьютерном эксперименте

Четвертый этап – **заключительный**, этап «сборки» гетерослоев.

При проектировании защитного экрана основные требования к сборке выглядят следующим образом:

1. Защитный экран представляет собой результат «сборки» слоев, каждый из которых выполняет определенную функцию поглотителя

отдельного типа излучения. Ядра атомов-поглотителей после поглощения должны излучать гамма-фотоны.

2. Предпоследний слой поглощает вторичные и первичные электроны.
3. Последний слой поглощает только гамма-излучение и его материал должен обладать хорошими тепловыми характеристиками (теплоотдачей).
4. Основу слоистой наногетероструктуры (первый слой) составляет пористая структура типа оксида алюминия (АОП). Двумерные сверхрешетки АОП под различными углами определяют целый набор периодов, согласующихся с верхним слоем нанокластеров-поглотителей частиц радиационного излучения.
5. Альтернативу оксиду алюминия с «жесткой» структурой сверхрешеток может составить нанопорошковая аморфная структура из углеродных нанотрубок, хаотическое расположение которых согласовано с любыми периодами верхнего слоя. Аморфную структуру можно применять и как «промежуточный» слой между слоями-поглотителями для «склеивания» слоев.
6. Требования к сборке могут быть удовлетворены только в том случае, когда известны структуры нанокластеров – поглотителей, то есть, создана база данных нанокластеров.
7. Время «жизни» защитного слоя зависит от условий, в которых находится защищаемая электроника или фотоника.

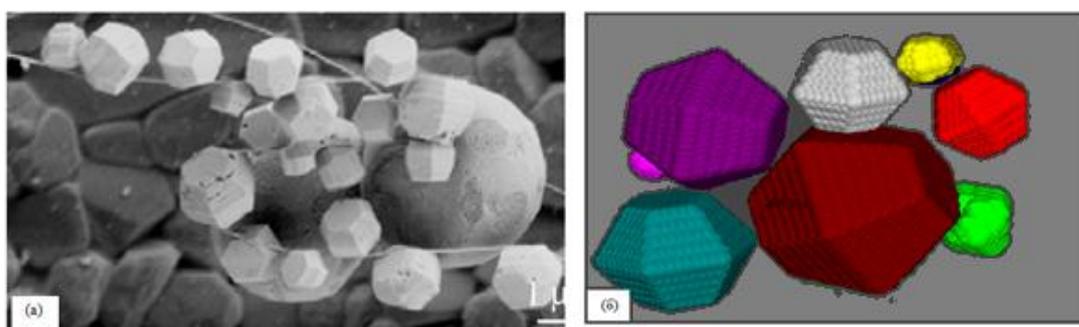


Рисунок 9. (а) Нанокластеры оксида цинка (размерами около 500нм) в электронной микроскопии [Zhong Lin Wang // J. Phys. Condens. Matter. 2004, 16, R829-R858.] и (б) рассчитанные в подпрограмме моделирования многоцентровой задачи зарождения кластеров ZnO.

В диссертации рассмотрены конкретные примеры расчетов и сборки отдельных многокластерных элементов систем радиоустройств (конденсатора, проводника, нанокольца и др.), а так же нанополикластерная структура вещества по программе многоцентрового роста (рисунок 9).

**В заключении** представлены основные выводы и результаты работы.

1. На базе проведенного анализа, проблем возникающих при переходе радиоэлектронных устройств на наноуровень созданы основы теории моделирования и проектирования радиоэлектронных устройств на наноуровне. исследованы вопросы комбинаторики и симметрии нульмерных нанокластеров, одномерных замкнутых циклов, двумерных (слоистых) и 3D - гетероструктур, как связанных элементов радиосхем.
2. Проведены модельные эксперименты на компьютере по расчету нанокластеров с использованием расширенной программы «Компьютерный наноскоп» для отработки методики проектирования радиоустройств с защитой от радиации.
3. Создана необходимая база данных по нанокластерам веществ, применяемых в радиотехнике, которые связаны с возможными радиационными превращениями.
4. Разработана методика компьютерного расчета реальных и модельных нанокластеров для проектирования защиты от радиации радиоустройств на наноуровне, используя программу многоцентровой задачи роста структур.
5. Исследованы на модельных нанокластерах радиационные эффекты, приводящие к перестройке их структуры.
6. Разработана организационная структура технологии сборки общей системы защиты радиоустройств от радиационного воздействия на наноуровне.

#### **Список публикаций по теме диссертации**

*Публикации в изданиях из списка ВАК:*

1. Никитин О.Р., Али Аббас Мохсин Али, Рау Т.Ф., Богаткина Е.Г., Рау В.Г. Радиоактивные нанокластеры в радиосистемах // Известия института инженерной физики – Серпухов – 2014. - №3 (33). – стр. 58-65.

2. Никитин О.Р., Горшков К.А., Али Аббас Мохсин Али, Рау Т.Ф., Рау В.Г. Наноструктурное исследование превращений в устройствах с радиоактивными нанокластерами // *Фундаментальные исследования*. – Москва – 2014. – № 5 (часть 5). – С. 964-968.

3. Рау В.Г., Никитин О.Р., А.А. Мохсин Али, Рау Т.Ф., Ломтев Л.А., Горшков К.А. Нанокластерные системы колец для электроники // *Фундаментальные исследования*. – Москва – 2015. – № 1 (часть 5). – С.137-142.

*Другие публикации:*

4. Никитин О.Р. Радиотехнические устройства на микро- и наноуровне: учебное пособие/ О.Р. Никитин, В.Г. Рау, К.А. Горшков, К.В. Скворцов, А.А. Мохсин Али – Муром: Ми ВлГУ, 2014. – 132 с.

5. Горшков К.А., Никитин О.Р., А. А. Мохсин Али , Рау В.Г. Топологии сети маршрутизации // *Всероссийская научно-практическая конференция XI Столетовские чтения* – Владимир – 2014 г. – С.26-29.

6. А.А. Мохсин Али Одномерные циклические разбиения в нанoeлектронике // *Методы и устройства передачи и обработки информации*. – Муром – 2015 - №17 – С.62 – 65.

7. А.А.Мохсин Али, О.Р.Никитин, Т.Ф.Рау, К.А. Горшков, В.Г.Рау Моделирование и проектирование защиты нанокластеров и радиоустройств на их основе// *Методы и устройства передачи и обработки информации*. – Муром – 2015 - №17 – С.65 – 70.

Подписано в печать 04.02.2016 г.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз.

Заказ \_\_\_\_\_

Издательство

Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.  
600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87