

УДК 621.3.049.77+620.3

ФИЗИКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР И УСТРОЙСТВ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

И.И. АБРАМОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 16 января 2014

Дан краткий обзор работ, выполненных и проводимых по направлению «Физика приборов микро- и нанoeлектроники» научно-исследовательской части БГУИР с непосредственным участием автора статьи либо им лично.

Ключевые слова: нанoeлектроника, микроeлектроника, приборная структура, моделирование.

Введение

Автор проводит научно-исследовательскую работу в области физики и моделирования элементов кремниевых интегральных схем (ИС) микроeлектроники, начиная с 1975 г. В 1982 г. была защищена кандидатская диссертация, а в 1993 г. докторская диссертация на тему: «Многомерное моделирование физических процессов в структурах кремниевых интегральных микросхем». Проведенные исследования нашли отражение в монографии [1] и более чем в 80 публикациях, включая 43 статьи в научно-технических журналах.

Начиная с 1994 г. автором начали проводиться исследования в области физики и моделирования не только приборных структур микроeлектроники, но и нанoeлектроники.

Наиболее существенными научными результатами периода работы с 1975 по 1997 гг. являлись [2]: 1) теория физических процессов в интегральной инжекционной логики элементах (И²Л-элементах); 2) методология многомерного моделирования физических процессов в элементах и фрагментах кремниевых ИС с учетом эффектов сильного легирования, саморазогрева и температуры окружающей среды; 3) методология автоматического синтеза компактных эквивалентных схем полупроводниковых приборов и структур; 4) принципы построения систем моделирования приборов микроeлектроники. К важным результатам следует также отнести: предложенные иерархии методов численного моделирования и моделей элементов кремниевых сверхбольших и ультрабольших ИС [2, 3]; разработанную совместно с профессором Борисенко В.Е. и к.ф.-м.н. Филоновым А.Б. концепцию развития нанoeлектроники в Беларуси и подготовки специалистов в этой области, включая учебную программу дисциплины «Нанoeлектроника» [4]. Как оказалось, в статье [4] была опубликована первая концепция развития нанoeлектроники в Беларуси, а также одна из первых в мире учебных программ по дисциплине «Нанoeлектроника» – нового в то время направления твердотельной eлектроники.

В этот же период времени автором были выделены основные типы приборных структур, которые представляют наибольший интерес при разработке нанoeлектронных ИС, а именно: 1) транзисторы с металл-диэлектрик-полупроводник структурой (МДП-структурой); 2) резонансно-туннельные структуры (диоды и транзисторы); 3) одноeлектронные структуры (транзисторы и многоостровковые структуры); 4) структуры на основе квантовых проволок. В настоящее время типы 2–4 считаются классическими в твердотельной нанoeлектронике. Эта работа являлась важной для дальнейших исследований, а проведенный в последующем анализ

в цикле статей [5–15] подтвердил справедливость сделанного прогноза развития в области наноэлектроники.

Приборные структуры одноэлектроники

Работы по физике и моделированию приборных структур одноэлектроники были начаты в БГУИР в 1995 г. Отметим, что одноэлектроника является одним из наиболее перспективных направлений наноэлектроники [8]. Детальный анализ работ в данной области проведен в статье [10].

Важным результатом проведенных на начальном этапе исследований в области одноэлектроники явилась классификация известных приборных структур [16, 17]. В частности, было выделено четыре класса одноэлектронных приборных структур: одноступенчатые приборы; цепочки туннельных переходов; матрицы туннельных переходов и массивы туннельных переходов, а также возможные следующие их виды: металлические; полупроводниковые; диэлектрические; органические и композиционные.

Было также установлено, что известные электрические модели приборных структур рассматриваемого типа обладают рядом недостатков, наиболее существенными из которых являются сложности исследования влияния конструктивно-технологических и электрофизических параметров на характеристики структур и физические процессы в них. Поэтому была актуальна задача разработки физико-топологических моделей приборных структур одноэлектроники.

К сожалению, в общем случае необходимо решать очень сложную самосогласованную задачу [17]: систему уравнений для микрополей, кинетические уравнения и уравнение Шредингера. В результате модель становится практически не реализуемой.

В связи с этим в работах [17–22] была предложена более простая двумерная численная физико-топологическая модель металлического одноэлектронного транзистора в рамках полуклассического приближения, которая может быть реализована на персональных ЭВМ (ПЭВМ). В дальнейшем предложенный подход был распространен на случаи многоостровковых цепочек [23–27] и матриц туннельных переходов [10, 28]. Сущность разработанного подхода и его преимущества разъяснены в статье [10].

Важным в дальнейших исследованиях являлось распространение предложенного подхода на случаи учета со-туннелирования [28] и пространственного квантования не только в контактах, но и на островках приборных структур [28–32]. Отмечу, что разработанные численные модели позволяют получить хорошее согласование с экспериментальными данными для приборных структур одноэлектроники на различных материалах всех основных классов и видов [10, 17–33].

Здесь уместно заметить, что накопленный опыт в области микроэлектроники показывает, что модели приборных структур, которые не позволяли получить удовлетворительное согласование результатов расчета с экспериментальными данными, часто оказывались бесполезными, а иногда приводили к очень грубым ошибкам. Очевидно, что не следует их повторять в наноэлектронике, так как их цена будет еще выше. Кроме того, теоретические результаты, полученные с использованием моделей, согласующихся с экспериментом, вызывают, конечно же, больше доверия. По этой причине в проводимых в лаборатории исследованиях особое внимание всегда уделялось согласованию результатов моделирования с экспериментом.

Таким образом, предложенный подход к моделированию приборных структур одноэлектроники является универсальным. Его основные преимущества следующие [10]: 1) модели подхода обеспечивают более полную связь с конструктивно-технологическими и электрофизическими параметрами одноэлектронных приборных структур при одновременно хорошей адекватности моделирования. Это позволяет использовать модели данного подхода для определения необходимых размеров, подбора материалов и прогноза электрических характеристик приборов одноэлектроники, а также для более глубокого исследования физических процессов в них в целях выявления ряда закономерностей [17–33]. Возможно и восстановление некоторых геометрических размеров структур, которые практически невозможно идентифицировать экспериментально [26]; 2) число согласуемых с экспериментом

параметров в моделях невелико (всего лишь несколько) и обычно не возрастает с ростом числа островков. Предложенный подход не имеет аналогов в мировой литературе до сих пор и характеризуется высокой эффективностью. Книга [17] – одна из первых монографий в Беларуси и на постсоветском пространстве в области наноэлектроники.

Резонансно-туннельные приборные структуры и устройства

Исследования по физике и моделированию резонансно-туннельного типа структур были также начаты в 1995 г. Детальный анализ работ в данной области проведен в статье [9]. Так, наноэлектронные ИС на основе резонансно-туннельных структур на соединениях типа $A^{III}B^V$ производились серийно в США уже в конце 90-х гг. прошлого века. Так как ключевой приборной структурой здесь является резонансно-туннельный диод (РТД), то основные усилия были направлены именно на их исследование. Замечу, что РТД – самые быстродействующие приборы твердотельной электроники (в настоящее время созданы приборы с частотами функционирования более 2 ТГц).

Несмотря на, казалось бы, относительно простой принцип функционирования РТД, протекающие в реальном приборе физические процессы, как правило, существенно усложняются вследствие следующих факторов [9]: прибор является открытой системой, так как имеет место обмен энергией и частицами с окружением; электроны в приборе могут рассеиваться на фононах, неровностях поверхностей раздела, примесях, дефектах, электронах и др.; значительное влияние могут оказывать различного рода флуктуации (толщин слоев, распределения примеси, состава и др.); важна реальная зонная структура исследуемой системы; значительное влияние могут оказывать заряды на поверхностях раздела и др. Эти факторы существенно усложняют задачу, приводят к дополнительным механизмам транспорта (к резонансному и последовательному туннелированию) и делают эту задачу фактически неразрешимой в строгом виде даже для РТД [9]. К сожалению, практически невозможна и строгая постановка задачи моделирования конкретного РТД [9].

Разработка моделей этих структур обычно проводится в рамках следующих квантовомеханических формализмов: волновых функций, функций распределения Вигнера и функций Грина. Несмотря на значительные усилия по созданию адекватных моделей РТД, крайне редко с их помощью удается получить удовлетворительное согласование результатов расчета вольт-амперных характеристик (ВАХ) с экспериментальными данными. Основные причины отмечены выше, а более детально рассмотрены в [9].

В связи с изложенным нами использовались четыре подхода: 1) в качестве основного выбран формализм волновых функций, как наиболее экономичный для описания наноэлектронных приборов [8, 9]; 2) разрабатывалась иерархия моделей [34]; 3) создавались модели, которые были достаточно адекватны, точны и в то же время экономичны лишь для определенной системы материалов, т. е. было ослаблено требование универсальности модели [35]. Мы придерживались определений терминов точность, адекватность, экономичность и универсальность математической модели, приведенными в [36]; 4) разработка наиболее адекватных численных моделей осуществлялась на основе квантовомеханического и полуклассического подходов к описанию полупроводников, т.е. создавались модели, относящиеся к классу комбинированных моделей [9]. Это связано с тем, что РТД включает в себя не только наноструктуры (активные области), но и протяженные (пассивные) области.

На начальном этапе была разработана комбинированная однозонная модель РТД, основанная на самосогласованном численном решении уравнений Шредингера и Пуассона [37–41]. К сожалению, с помощью, как правило, более экономичных однозонных моделей редко удается получить удовлетворительное согласование результатов расчета ВАХ с экспериментальными данными [37, 40]. Это также относится к однозонным моделям других авторов [9]. В связи с этим в дальнейшем основные усилия были сосредоточены на разработке более сложных комбинированных двухзонных моделей РТД, основанных на самосогласованном численном решении системы уравнений Шредингера и уравнения Пуассона [29, 35, 41–47].

С использованием разработанной иерархии моделей были установлены закономерности функционирования РТД в зависимости от следующих факторов [29, 35, 37–47]: уровней

легирования областей; ширины различных областей; формы разрыва зон на гетерограницах; механизмов рассеяния; заряда активной области; плотности поверхностного заряда; девиации ширины потенциальных барьеров; константы взаимодействия между зонами; поперечного волнового вектора; температуры; сопротивления приконтактных областей и др. При этом исследовались РТД на основе GaAs/AlAs, GaAs/AlGaAs, InAlAs/InGaAs, InAs/AlSb/GaSb, Si/Ge, Si/SiGe, углеродных нанотрубок (УНТ). Ряд из отмеченных факторов учтен при моделировании впервые. Было также получено удовлетворительное согласование результатов расчета с экспериментом для шести различных РТД, что не удавалось ни одной из групп исследователей в мире.

С целью возможности моделирования не только стационарных, но и переходных процессов в резонансно-туннельных структурах (РТС), приборах и схемах на их основе была разработана иерархия электрических моделей на уровне эквивалентных схем, а именно: нелинейная модель РТД [48, 49]; модель РТД для анализа переходных процессов [49]; универсальная модель двухбарьерных РТС [50]. Была также разработана методика идентификации параметров электрических моделей по экспериментальным данным либо по расчетам на основе численных моделей [34, 51]. С использованием электрических моделей проводилось моделирование ряда более сложных устройств [48, 52]: логических элементов, включающих РТС; генераторов различных сигналов; СВЧ-генераторов; преобразователей частоты. Проведенный комплекс научно-исследовательских работ данного типа приборных структур и устройств на их основе не имеет аналогов в мире до сих пор.

Приборные структуры на квантовых проволоках

Работы по физике и моделированию приборных структур на квантовых проволоках в нанoeлектронике были начаты в 1997 г. Заметим, что в то время эти структуры считались малоперспективными, однако, впоследствии ситуация в корне изменилась. В настоящее время они считаются одними из самых перспективных в нанoeлектронике. Детальный анализ работ в данной области проведен в статьях [11, 12].

На начальном этапе была проведена оценка потенциальных (предельных) электрических характеристик квантовых интерференционных Т-транзисторов на четырех материалах (GaAs, InAs, InSb, Si). При построении модели использовался метод матрицы рассеяния, а также учитывалась зависимость эффективной массы от поперечных размеров квантовых проволок. Последнее принципиально важно ввиду экстремально малых значений этих размеров в данных исследованиях. Анализ проводился при температуре $T = 4,2$ К для того, чтобы максимально уменьшить влияние процессов рассеяния. Было установлено, что при экстремально малых ширинах проволоки ни один из исследованных материалов может не иметь существенных преимуществ перед другими по частотным характеристикам проанализированных Т-транзисторов с одним и двумя затворами [53].

В дальнейшем модель была модифицирована не только для учета зависимости эффективной массы от геометрических размеров квантовой проволоки и концентрации примеси в ней (используется самосогласованный расчет эффективной массы), но и для учета рассеяния на удаленной заряженной примеси и на неоднородностях поверхности квантовой проволоки [54]. Учет рассеяния принципиально важен с ростом температуры. Исследовались ВАХ и частотные характеристики однозатворных Т-транзисторов на восьми технологически значимых для микро- и нанoeлектроники материалах, а именно: Si, Ge, GaAs, InAs, GaSb, InSb, GaP, InP. Было также проведено сопоставление с экспериментальными данными. Заметим, что в литературе крайне редко проводится сравнение результатов расчета электрических характеристик приборных структур на квантовых проволоках с экспериментальными данными.

Более строгая и адекватная модель разработана в рамках формализма функций Вигнера. Она позволяет рассчитывать электрические характеристики собственно квантовых проволок и интерференционных Т-транзисторов. Модель позволяет более детально исследовать стационарные и переходные процессы в структурах с учетом механизмов рассеяния, однако, к сожалению, требует значительных затрат вычислительных ресурсов ЭВМ. За приемлемое время на ПЭВМ кинетическое уравнение Вигнера может быть решено с помощью метода

Монте-Карло только при учете рассеяния на потенциальном профиле для резистора на квантовой проволоке, т. е. простейшей структуры. Обзор этих работ приведен в [11, 12, 34].

Отмеченные результаты для приборных структур на квантовых проволоках не имели аналогов в мировой литературе на момент их публикации.

Система моделирования NANODEV

Специалистам в области электроники (микроэлектроники, СВЧ-электроники и др.) хорошо известно, что разработка и доведение более или менее сложных изделий даже до мелкосерийного производства невозможно без соответствующего инструментария моделирования, систем автоматизированного проектирования. Ситуация становится еще более критической в нанoeлектронике, так как для моделирования соответствующих устройств необходимо разрабатывать, как правило, гораздо более сложные – численные квантовомеханические модели. И в то же время без средств моделирования подавляющее большинство устройств нанoeлектроники останутся всего лишь поделками.

По изложенным причинам в мире уделяется очень серьезное внимание разработке инструментария моделирования приборных структур и устройств нанoeлектроники (анализ состояния проведен в статьях [8–15]).

Так, первый в мире проект NEMO в области разработки систем моделирования нанoeлектронных приборов начал осуществляться в США еще в 1993 г. Сначала в нем участвовали специалисты четырех университетов и фирмы Texas Instruments. Сейчас работы продолжают под эгидой NASA. Анализ показал, что в настоящее время следующие системы моделирования характеризуются наибольшей универсальностью для приборных структур нанoeлектроники [29]: 1) NEMO (начало разработки – 1993 г., первая публикация* – 1995 г.); 2) NANODEV (начало разработки – 1995 г., первая публикация – 1996 г.); 3) QDAME (начало разработки – 1999/2000 гг., первая публикация* – 2002 г.). Системы NEMO и QDAME (разрабатывается специалистами фирмы IBM) предназначены для суперЭВМ.

Система моделирования нанoeлектронных приборов NANODEV начала разрабатываться специалистами БГУИР с 1995 г. Система предназначена для моделирования трех типов приборных структур: 1) одноэлектронных; 2) резонансно-туннельных; 3) на квантовых проволоках. В отличие от указанных систем она позволяет моделировать все основные классические типы приборных структур нанoeлектроники и может использоваться на ПЭВМ. Ее основу составило программное обеспечение (ПО), реализующее отмеченные выше модели. Принципы организации системы NANODEV и ее структура подробно описаны в статье [34]. Ранние этапы в разработке неплохо отражены в статьях [34, 55, 56], а более поздние модификации – в статьях [28, 29].

К сожалению, разработка моделей и соответствующего ПО в области нанoeлектроники характеризуются исключительно высокой степенью сложности и трудоемкости. Проблемы здесь, прежде всего, связаны с необходимостью разработки сложных численных комбинированных моделей, причем обычно встречающимися случаями являются взаимодействия наноструктур (активных областей) и макроскопических областей (см. ранее), т. е. имеют место квантовые измерения в традиционном для квантовой механики понимании. Специалистам известно, что это исключительно сложный вопрос. Кроме того, целесообразно разрабатывать иерархии моделей различной адекватности. В результате, работы характеризуются большой трудоемкостью и растягиваются на десятилетия. Опыт зарубежных коллег это также подтверждает.

Ситуация усугубляется отсутствием требуемого коммерческого ПО в данной области. Отмеченный выше инструментарий является научно-исследовательским. В этом плане показателен опыт сотрудничества с компанией Silvaco (США) – одного из мировых лидеров в разработке коммерческого ПО приборно-технологического базиса в микроэлектронике. Так, система моделирования приборов ATLAS компании является доведением до коммерческого ПО PISCES, разработанного в Стэнфордском университете в начале 80-х гг. прошлого века.

* Сведения о начале работ и первых публикациях получены от руководителей проектов.

Автор имеет опыт проведения совместных работ с этой компанией с 2003 по 2005 годы. В частности, у специалистов компании вызвала интерес работа автора, описанная в статьях [57, 58], по восстановлению по минимуму информации электрических характеристик элемента сверхбольшой ИС с инжекционным питанием, изготовленной в Японии, и выполненная с помощью разработанной автором в начале 80-х гг. прошлого века универсальной программы двумерного численного моделирования PNAИЛ (более подробно см. [2]). Оказалось, что результаты восстановления электрических характеристик с помощью PNAИЛ и ATLAS совпали с высокой степенью точности. Подробно совместные работы описаны в статье [59]. Автор воспользовался возможностью и предложил для доведения компанией до коммерческого ПО хотя бы некоторых модулей системы NANODEV. Смысл ответа заключался в том, что компании предстоит очень много работ (модернизация, т.е. постоянная поддержка) по системе ATLAS, несмотря на то что уже прошло около 20 лет со времени создания PISCES! Это, кстати, согласуется с опытом по разработке ПО схемотехнического моделирования. Из огромного числа ПО коммерциализована была фактически одна – программа SPICE, и на это потребовались тоже десятилетия. В то же время схемотехническое моделирование гораздо проще в математическом плане по сравнению с моделированием приборных структур даже микроэлектроники, так как основывается на решении систем обыкновенных дифференциальных уравнений, а не систем дифференциальных уравнений в частных производных.

В подобной ситуации, так как в открытом доступе изредка встречаются, как правило, лишь демонстрационные версии ПО (в качестве «черного ящика»), обычной практикой являются расчеты под заказ, выполняемые непосредственно разработчиками ПО.

В целом, система NANODEV вызвала большой интерес у специалистов ближнего и дальнего зарубежья. Очень часто различные ведущие, как правило, американские и европейские журналы в соответствующих областях знаний обращаются с предложением публикаций сведений о новых модификациях в NANODEV.

Другие приборные структуры и устройства

Хотя в качестве первого типа приборных структур, которые представляют интерес для микроэлектроники, были выделены транзисторы с МДП-структурой (см. введение), исследования после защиты докторской диссертации в этом направлении фактически не проводились. Это связано с двумя основными причинами. Во-первых, физика функционирования нанотранзисторов с МДП-структурой, как правило, не отличается качественно от физики МДП-транзисторов микроэлектроники. Фактически эти приборные структуры являются переходными от микро- к микроэлектронике. Действительно, влияние квантовых эффектов обычно усиливается, однако последние могут быть важны и в обычных биполярных транзисторах (вырождение носителей заряда в эмиттере) и в МДП-транзисторах (пространственное квантование в инверсионных слоях) микроэлектроники. Во-вторых, для моделирования нанотранзисторов с целью исследования новых физических закономерностей необходимы высокопроизводительные вычислительные системы. Более подробно с проблемами, принципами физики и моделирования этого типа приборных структур микроэлектроники можно ознакомиться в статьях [13–15]. Тем не менее и для этой области был получен ряд важных результатов.

Ранее автором была предложена методология автоматического синтеза компактных эквивалентных схем полупроводниковых приборов и структур микроэлектроники [2, 60–63]). В статье [14] была показана ее применимость и для нанотранзисторов с МДП-структурой.

Длительное время между специалистами шли (нередко ожесточенные) споры о разграничении между микро- и микроэлектроникой. Часто ориентир шел на квантовые эффекты в приборных структурах. Однако, как отмечалось, даже в обычных элементах микроэлектроники они могут оказывать существенное влияние. Ситуация сводилась к абсурду. Существовали как бы «правильные» и «неправильные» квантовые эффекты. Автор рассмотрел этот вопрос в статье [64] и предложил относить к микроэлектронике приборные структуры (элементы ИС) с характеристическими размерами в диапазоне от 1 до 100 нм. В настоящее время эта точка зрения фактически узаконена в стандарте Российской Федерации.

Дополнительные пояснения, а также определение термина «нанoeлектроника» даны в статье [15]. Остановимся кратко на некоторых других исследованиях.

В пленарном докладе на конференции КрыМиКо'96 был сформулирован принцип когерентного транспорта с самоорганизацией, который может быть реализован в ряде приборных структур с очень тонкими (наноразмерными) слоями. В статьях [65–69] описаны исследования разнообразных приборных структур, функционирующих на этом принципе. Ввиду необходимости моделирования переходных процессов осуществлялся качественный математический анализ работы приборных структур этого типа.

Интересными были исследования с докторантом Дворниковым О.В. по проектированию специализированных аналоговых ИС на основе предложенного подхода с применением комбинированных (электрических и физико-топологических) моделей, описанные в монографии [70] и в статьях [71–74], а также с сотрудниками НИЛ 4.2 НИЧ БГУИР, Белгосуниверситета, Германии и Китая по структурам на основе анодного оксида алюминия [75–77].

Устройства, включающие углеродные нанотрубки

Работы по исследованию этих устройств инициированы в 2010 г. академиком Лабунным В.А. Перспективным направлением использования УНТ является создание на их основе радиоприемников (нанорадио), первые экспериментальные реализации которых описаны специалистами двух групп из США в 2007 г. Обзор достижений, установление и анализ проблем разработки нанорадио на основе УНТ, а также выделение основных путей их решения даны в пленарном докладе на конференции «КрыМиКо'2011». Было показано, что для радиоприемников двух типов (на единственной УНТ и гибридное радио, когда отдельные компоненты реализуются на УНТ) можно выделить следующие основные проблемы: 1) требуемые большие прикладываемые напряжения; 2) сложность настройки на разные частоты; 3) технологические, связанные с использованием УНТ; 4) физики и моделирования. Основными по разрешению комплекса проблем 1–3 будут являться следующие подходы: 1) усовершенствование структурной схемы нанорадио; 2) создание различных вариантов гибридного радио; 3) технологические усовершенствования. Одной из ключевых является проблема физики и моделирования рассматриваемых устройств. В то же время без инструментария моделирования доведение нанорадио даже до мелкосерийного производства будет просто невозможно.

Рассматриваемая задача характеризуется очень высокой степенью сложности. Так, нанорадио первого типа является нанoeлектромеханической системой и должно моделироваться как единое целое, строго говоря, на уровне квантовомеханических моделей. Анализ показывает, что на современном уровне развития вычислительной техники это просто невозможно. Поэтому было выделено два перспективных подхода к моделированию нанорадио: 1) многоуровневый подход; 2) подход на основе иерархии различных моделей. Было реализовано оба подхода.

Многоуровневый подход был реализован совместно с коллегами из БНТУ и использовался для моделирования нанорадио первого типа. Результаты подробно описаны в статье [78]. В частности, были исследованы различные конструкции нанорадио (расположение и количество электродов, расстояний между УНТ и их диаметра) на единичных УНТ и ориентированных массивах УНТ отличающейся геометрии при различных прикладываемых напряжениях и показана работоспособность исследованных устройств в радиочастотном диапазоне. При реализации подхода применялось лицензионное программное обеспечение, а расчеты осуществлялись на высокопроизводительной вычислительной технике БНТУ.

К сожалению, достаточно строгая методика многоуровневого моделирования [78] требует для своей реализации мощной вычислительной техники, а также применима для нанорадио первого типа. В ряде же практически важных случаев для технологов желательны экспрессные, хотя и менее точные, оценки, которые, однако, можно выполнить на ПЭВМ. В связи с этим был реализован и второй подход, т.е. на основе иерархии различных моделей. В частности, разработана методика экспрессного расчета на ПЭВМ нанорадио на основе УНТ как первого, так и второго типов. Разработанные программы, реализующие эту методику,

включены в систему моделирования NANODEV (см. ранее). Описанные результаты по нанорадио на основе УНТ не имеют аналогов в мире.

Другим типом устройств, включающих УНТ, являются биосенсоры повышенной чувствительности. Эти работы осуществляются совместно с Белгосуниверситетом и рядом других организаций Республики Беларусь. Исследуемые устройства также сложны для анализа, так как включают не только неорганические (анодный оксид алюминия и др.), но и органические (биоклетки и др.) материалы. Более или менее строгое моделирование систем такой сложности вряд ли возможно, поэтому осуществляется в настоящий момент времени на уровне эквивалентных электрических схем, т.е. достаточно простых электрических моделей [79]. Уже изготовлены экспериментальные образцы биосенсоров, обладающих уникальной чувствительностью к различным вирусам с ультранизкой концентрацией.

Мозг – объект электроники

Впервые интерпретация мозга человека как объекта органической гибридной наноэлектроники прозвучала на 11-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо'2001 (10–14 сентября 2001 г., г. Севастополь) в ответе автора на вопрос о достижениях в области наноэлектроники.

В статье [5] были опубликованы пояснения интерпретации, однако потребовались еще годы для более глубокого анализа функционирования мозга. Его результаты сначала были доложены на трех Международных конференциях в пленарных и устном докладах. Они вызвали большой интерес у слушателей. Ряд ведущих журналов США и Англии в самых различных областях знаний предложили написать заказные статьи по этой теме. Китайские коллеги пригласили представить пленарный доклад на 3-м Международном Конгрессе «Nano Science & Technology 2013» (Nano-S&T 2013). Узнав об этой работе, не меньший интерес к ней проявили студенты и магистранты кафедры микро- и наноэлектроники БГУИР.

В связи с изложенным выше детально проведенная работа опубликована в монографии [80] и цикле статей [81–84]. Недавно вышел перевод монографии на английский язык [85].

В монографиях [80, 85] впервые дается последовательная интерпретация функционирования мозга как объекта электроники. Формулируются три гипотезы, которые, с одной стороны, помогают объяснить восприятие, мышление и иные важные психические функции, а с другой, – предложить перспективный комплексный подход детального исследования мозга, основанный на схемах многоуровневого моделирования в сочетании с экспериментальными методами. Поясняются принципы функционирования мозга с точки зрения специалиста в области электроники. Впервые дается четкое определение, что такое мысль. Данная работа не имеет аналогов в мире.

Заключение

Итак, наиболее существенными научными результатами проведенных исследований являются: 1) теории физических процессов в ряде приборных структур и устройств микро- и наноэлектроники, а именно: И²Л-элементах; одноэлектронных транзисторах, цепочках и матрицах туннельных переходов; резонансно-туннельных структурах и схемах; интерференционных транзисторах; квантовых проволоках; наноструктурах, функционирующих на принципе когерентного транспорта с самоорганизацией; устройствах, включающих УНТ; 2) методология многомерного моделирования физических процессов в элементах и фрагментах кремниевых ИС с учетом эффектов сильного легирования, саморазогрева и температуры окружающей среды; 3) иерархии методов численного моделирования и моделей элементов кремниевых сверхбольших и ультрабольших ИС; 4) модели приборных структур наноэлектроники, функционирующих на эффектах одноэлектронного, резонансного туннелирования и квантовой интерференции; 5) методология автоматического синтеза компактных эквивалентных схем полупроводниковых приборов, приборных структур микро- и наноэлектроники; 6) принципы построения систем моделирования приборных структур и

устройств микро- и нанoeлектроники; 7) полная электронная интерпретация функционирования мозга человека.

Результаты проведенных исследований отражены в 373 публикациях, включая шесть монографий, 186 статей в научно-технических журналах, а также шесть учебных пособий. Автор принял участие в исследованиях по более чем 30 темам, в том числе в качестве научного руководителя в 27 НИР и в одной ОКР.

Благодарности

Считаю своим приятным долгом выразить глубокую признательность академику Лабуну В.А. за постоянную поддержку в работе, профессору Батуре М.П., профессору Ильину В.М., члену-корреспонденту Муравьеву В.В., профессору Соколу В.А. за оказанную поддержку при создании НИЛ 4.1, в процессе ее становления и развития, профессору Борисенко В.Е., д.т.н. Дворникову О.В., профессору Углову В.В., профессору Харитонову В.В., д.ф.-м.н. Цурко В.А., доценту Баркалину В.В., к.ф.-м.н. Берашевич Ю.А., доценту Данилюку А.Л., к.ф.-м.н. Игнатенко С.А., к.ф.-м.н. Крыловой Г.В., к.ф.-м.н. Новик Е.Г., к.ф.-м.н. Филонову А.Б., Баранову А.Л., Гончаренко (Романовой) И.А, Коломейцевой Н.В., Королеву А.В., Ореховской Т.И., Рогачеву А.И., Щербаковой И.Ю. и другим коллегам, с которыми были получены многие из описанных в статье научных результатов.

PHYSICS AND SIMULATION OF VARIOUS MICRO- AND NANOELECTRONIC DEVICES

I.I. ABRAMOV

Abstract

The short overview of works performed in the research Laboratory for Physics of Micro- and Nanoelectronic Devices of BSUIR with the direct participation of author or made by himself is given.

Список литературы

1. *Абрамов И.И., Харитонов В.В.* Численное моделирование элементов интегральных схем. Минск: Вышэйшая школа. 1990.
2. *Абрамов И.И.* Моделирование физических процессов в элементах кремниевых интегральных микросхем. Минск, 1999.
3. *Abramov I.I.* // Physics, chemistry and application of nanostructures. Minsk, 1995. P. 257–259.
4. *Борисенко В.Е., Абрамов И.И., Филонов А.Б.* // Адукацыя і выхаванне. 1996. № 4 (52). С. 58–70.
5. *Абрамов И.И.* // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 8. С. 34–37.
6. *Абрамов И.И.* // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 9. С. 26–36.
7. *Абрамов И.И.* // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 1. С. 36–47.
8. *Абрамов И.И.* // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 2. С. 24–32.
9. *Абрамов И.И.* // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 3. С. 57–70.
10. *Абрамов И.И.* // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 7. С. 10–24.
11. *Абрамов И.И.* // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 7. С. 14–29.
12. *Абрамов И.И.* // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 8. С. 7–23.
13. *Абрамов И.И.* // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 9. С. 27–37.
14. *Абрамов И.И.* // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 10. С. 28–41.
15. *Абрамов И.И.* // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 11. С. 29–42.
16. *Абрамов И.И., Новик Е.Г.* // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 33. Вып. 11. С. 1388–1394.
17. *Абрамов И.И., Новик Е.Г.* Численное моделирование металлических одноэлектронных транзисторов. Минск, 2000.
18. *Абрамов И.И., Новик Е.Г.* // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 16. С. 63–67.
19. *Абрамов И.И., Новик Е.Г.* // Микроэлектроника. 2000. Т. 29. Вып. 3. С. 197–201.
20. *Абрамов И.И., Гончаренко И.А., Новик Е.Г.* // Изв. вузов. Электроника. 2000. № 2. С. 87–94.
21. *Абрамов И.И., Новик Е.Г.* // Физика и техника полупроводников. 2000. Т. 34. Вып. 8. С. 1014–1019.

22. *Абрамов И.И., Новик Е.Г.* // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. Вып. 4. С. 489–491.
23. *Абрамов И.И., Игнатенко С.А., Новик Е.Г.* // Физика и техника полупроводников. 2002. Т. 36. Вып. 10. С. 1272–1277.
24. *Абрамов И.И., Игнатенко С.А., Новик Е.Г.* // Микросистемная техника. 2002. № 5. С. 30–33.
25. *Абрамов И.И., Игнатенко С.А., Новик Е.Г.* // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37. Вып. 5. С. 583–587.
26. *Абрамов И.И., Игнатенко С.А., Новик Е.Г.* // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37. Вып. 10. С. 1231–1234.
27. *Abramov I.I., Ignatenko S.A.* // Proc. of SPIE. 2004. Vol 5401. P. 432–441.
28. *Abramov I.I., Abramov K.I., Goncharenko I.A. et. al.* // Proc. of SPIE. 2006. Vol. 6260. P. 62601Q – 1–8.
29. *Abramov I.I., Varanoff A.L., Goncharenko I.A. et. al.* // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7521. P. 75211E – 1–11.
30. *Абрамов И.И., Баранов А.Л.* // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 3. С. 2–6.
31. *Абрамов И.И., Баранов А.Л.* // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 10. С. 18–20.
32. *Abramov I.I., Varanoff A.L., Romanova I.A. et. al.* // Proc. of SPIE. 2013. V. 8700. P. 870014 – 1–8.
33. *Абрамов И.И., Гончаренко И.А., Новик Е.Г.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. Вып. 8. С. 16–19.
34. *Абрамов И.И., Гончаренко И.А., Игнатенко С.А. и др.* // Микроэлектроника. 2003. Т. 32. № 2. С. 124–133.
35. *Абрамов И.И., Гончаренко И.А., Коломейцева Н.В.* // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 3. С. 10–13.
36. *Абрамов И.И.* Лекции по моделированию элементов интегральных схем. Москва–Ижевск, 2005.
37. *Абрамов И.И., Гончаренко И.А.* // Электромагнитные волны и электронные системы. 2002. Т. 7. № 3. С. 54–60.
38. *Abramov I.I., Goncharenko I.A., Kolomejtseva N.V.* // Proc. of SPIE. 2004. Vol. 5401. P. 482–487.
39. *Абрамов И.И., Гончаренко И.А.* // Доклады БГУИР. 2004. № 4. С. 37–41
40. *Абрамов И.И., Гончаренко И.А., Коломейцева Н.В.* // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39. Вып. 9. С. 1138–1145.
41. *Abramov I.I., Goncharenko I.A., Kolomejtseva N.V.* // Proc. of SPIE. 2006. Vol. 6260. P. 62601S – 1–8.
42. *Абрамов И.И., Гончаренко И.А., Коломейцева Н.В.* // Микросистемная техника. 2004. № 9. С. 36–40.
43. *Абрамов И.И., Гончаренко И.А., Коломейцева Н.В.* // Докл. БГУИР. 2004. № 4. С. 42–46.
44. *Абрамов И.И., Гончаренко И.А., Коломейцева Н.В.* // Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41. Вып. 11. С. 1395–1400.
45. *Абрамов И.И., Коломейцева Н.В.* // Нано- и микросистемная техника. 2011. № 10. С. 18–20.
46. *Abramov I.I., Kolomejtseva N.V., Romanova I.A. et. al.* // Proc. of SPIE. 2013. Vol. 8700. P. 870013 – 1–8.
47. *Абрамов И.И., Коломейцева Н.В., Романова И.А.* // Микроэлектроника. 2012. Т. 41. № 5. С. 373–382.
48. *Абрамов И.И., Данилюк А.Л., Королев А.В.* // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2000. Т. 43. № 3. С. 59–63.
49. *Абрамов И.И., Данилюк А.Л., Королев А.В.* // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2000. № 2. С. 75–79.
50. *Абрамов И.И., Данилюк А.Л., Королев А.В.* // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2001. № 1. С. 78–81.
51. *Абрамов И.И., Королев А.В., Гончаренко И.А.* // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2003. Т. 46. № 1. С. 53–57.
52. *Абрамов И.И., Королев А.В.* // Журнал технической физики. 2001. Т. 71. Вып. 9. С. 128–133.
53. *Абрамов И.И., Берашевич Ю.А., Данилюк А.Л.* // Журнал технической физики. 1999. Т. 69. Вып. 11. С. 130–131.
54. *Абрамов И.И., Рогачев А.И.* // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. Вып. 11. С. 1365–1369.
55. *Novik E.G., Sheremet I.V., Ivashkevich S.S. et. al.* // Physics, chemistry and application of nanostructures. Singapore: World Scientific. 1997. P. 317–321.
56. *Абрамов И.И., Берашевич Ю.А., Шеремет И.В. и др.* // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 1999. Т. 42. № 2. С. 46–50.
57. *Абрамов И.И., Харитонов В.В.* // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 1987. № 3. С. 62–65.
58. *Абрамов И.И., Харитонов В.В.* // Микроэлектроника. 1988. Т. 17. № 2. С. 169–174.
59. *Abramov I.I., Dobrushkin V.A., Tsurko V.A. et. al.* // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2005. Vol. 8. № 3. P. 296–301.
60. *Абрамов И.И.* // Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника. 1985. Т. 28. № 11. С. 63–69.
61. *Абрамов И.И., Харитонов В.В.* // Весці АН БССР. Сер. фіз.-энерг. навук. 1987. № 3. С. 78–84.
62. *Абрамов И.И.* // Микросистемная техника. 2002. № 6. С. 18–23.
63. *Abramov I.I.* // Proc. of SPIE. 2006. V. 6260. P. 62601I – 1–8.
64. *Абрамов И.И.* // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 6. С. 2–4.
65. *Abramov I.I., Danilyuk A.L.* // Physics, chemistry and application of nanostructures. Singapore, 1997. P. 314–316.
66. *Абрамов И.И., Данилюк А.Л.* // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1997. № 3. С. 64–68.
67. *Abramov I.I., Danilyuk A.L.* // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 71. № 5. P. 665–667.
68. *Абрамов И.И., Данилюк А.Л.* // Докл. НАНБ. 1998. Т. 42. № 5. С. 55–59.
69. *Абрамов И.И., Данилюк А.Л.* // Журнал технической физики. 1998. Т. 68. № 12. С. 93–94.
70. *Абрамов И.И., Дворников О.В.* Проектирование аналоговых микросхем для прецизионных измерительных систем. Минск, 2006.
71. *Абрамов И.И., Дворников О.В.* // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 10. С. 23–35.

72. *Абрамов И.И., Дворников О.В.* // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 11. С. 30–35.
73. *Абрамов И.И., Дворников О.В.* // Информационные технологии. 2007. № 5. С. 17–21.
74. *Абрамов И., Дворников О.* // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 4. С. 96–100.
75. *Uglov V.V., Cherenda N.N., Khodasevich V.V., Sokol V.A., Abramov I.I.* // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1999. В 147. Р. 332–336.
76. *Литвинович Г.В., Сокол В.А., Углов В.В. и др.* // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2000. № 1. С. 15–18.
77. *Углов В.В., Занг Дж., Черенда Н.Н. и др.* // Перспективные материалы. 2000. № 2. С. 76–87.
78. *Barkaline V., Abramov I., Belogurov E. et. al.* // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2012. Vol. 15. № 1. Р. 23–42.
79. *Абрамов И.И., Грушевский В.В., Крылов Г.Г. и др.* // Петербургский журнал электроники. 2012. № 4 (73). С. 59–67.
80. *Абрамов И.* Мозг как объект электроники. Saarbrücken, 2012.
81. *Абрамов И.И.* // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 1. С. 52–54.
82. *Абрамов И.И.* // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 3. С. 45–53.
83. *Абрамов И.И.* // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 5. С. 45–54.
84. *Абрамов И.И.* // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 6. С. 49–53.
85. *Abramov I.I.* Brain as an object of electronics. Saarbrücken, 2013.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



Абрамов Игорь Иванович (1954 г.р.), д.ф.-м.н., профессор. В 1976 г. окончил физический факультет БГУ, в 1982 году защитил кандидатскую, в 1993 – докторскую диссертацию. Профессор кафедры микро- и нанoeлектроники БГУИР, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Физика приборов микро- и нанoeлектроники» БГУИР. Автор и соавтор 373 публикаций, включая 6 монографий, 186 статей в научно-технических журналах, а также 6 учебных пособий. Область научных интересов: физика и моделирование приборных структур и схем микро- и нанoeлектроники; мозг человека.