

УДК 538.945

НАНОЭЛЕКТРОНИКА И НАНОТЕХНОЛОГИЯ В БЕЛОРУССКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ: ОТ ПЕРВЫХ ШАГОВ ДО СЕГОДНЯШНЕГО ДНЯ

В.Е. БОРИСЕНКО

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

Поступила в редакцию 19 ноября 2003

Представлены основные этапы развития работ по нанoeлектронике и нанотехнологии в БГУИР. Показаны организационная структура научных исследований и главные научные результаты, подготовка специалистов с высшим образованием и специалистов высшей научной квалификации, научные программы и международное сотрудничество.

Ключевые слова: нанoeлектроника, нанотехнология, БГУИР.

Введение

История развития нанoeлектроники и нанотехнологии в нашем университете на сегодняшний день насчитывает немногим более 10 лет. Эти направления, как и во всем мире, зародились и складывались на основе микроэлектроники и микроэлектронной технологии, главной тенденцией развития которых было и остается уменьшение размеров элементов интегральных микросхем, обеспечивающее повышение функциональной сложности, быстродействия и надежности этих важных для современных информационных технологий изделий электронной техники.

Переход от микронных ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$) к нанометровым ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$) размерам элементов полупроводниковых приборов приводит к необходимости не только качественного совершенствования технологических процессов, но и принципиально изменяет фундаментальные электронные, оптические и транспортные свойства твердотельных структур. На смену классическим механизмам поведения электронов приходят квантовые закономерности, которые делают невозможным эффективное функционирование классических микроэлектронных транзисторных и диодных структур, пассивных элементов и межсоединений, но зато открывают возможности создания новых поколений более быстродействующих сверхминиатюрных электронных и оптоэлектронных приборов на квантовых эффектах. В пределе, такие приборы могут состоять из одного или нескольких атомов.

Наш университет одним из первых в Беларуси организовал проведение систематизированных научных исследований и разработок по актуальным направлениям нанoeлектроники и нанотехнологии [1, 2], что позволяет ему и сегодня находиться в числе лидеров не только в республике, но по ряду достижений и в мире. В данном обзоре приведены наиболее значимые результаты этой работы. Они представлены в пяти главных разделах: научные подразделения, результаты научных исследований, подготовка специалистов с высшим образованием, подготовка специалистов высшей научной квалификации, научные программы и сотрудничество.

1. Научные подразделения

Структура научных подразделений, специализирующихся в области нанoeлектроники и нанотехнологии, начала складываться в начале 90-х годов прошлого века на базе научных лабораторий кафедры микроэлектроники (зав. каф. В.А. Лабунов). Основные исторические вехи ее формирования и современный вид представлены на рис. 1.

Наиболее широко и активно научные исследования и разработки в области нанoeлектроники и нанотехнологии сегодня ведутся в Центре нанoeлектроники и новых материалов, где выполняется большая часть проектов и координируется Межвузовская программа фундаментальных исследований "Нанoeлектроника XXI". Кроме приведенных на рисунке научных подразделений, отдельными вопросами нанотехнологии также занимаются в Лаборатории гибридных микросхем (зав. В.А. Сокол), Лаборатории монокристаллов сложных полупроводниковых соединений (зав. И.В. Боднар), Лаборатории материалов и элементов электронной и сверхпроводниковой техники (науч. рук. Л.М. Лыньков, зав. Г.В. Давыдов), Лаборатории диагностики средств вычислительной техники (зав. В.Н. Яролик), Лаборатории функциональных пленочных систем (зав. А.А. Хмыль), Группе моделирования технологических процессов (рук. А. Ф. Стекольников).

2. Результаты научных исследований

Иницирующим фактором начала активных научных исследований твердотельных наноразмерных структур послужило сообщение английского ученого L.T. Canham (1990) [3] об обнаружении при комнатной температуре интенсивной фотолюминесценции пористого кремния в видимом спектральном диапазоне. Этот факт свидетельствует о том, что наноразмерные частицы, составляющие пористый кремний, обладают свойствами прямозонного полупроводника, в то время как сам кремний в объемном состоянии является полупроводником непрямозонным.

К этому времени в научных группах В.П. Бондаренко, С.К. Лазарука и В.Е. Борисенко был уже накоплен значительный опыт в получении, исследовании и применении пористого кремния в интегральной электронике. Это позволило быстро сориентировать проводимые исследования на поиск путей применения нанокристаллического кремния (в форме пористого кремния) в зарождающейся кремниевой оптоэлектронике. В данном направлении были получены научные и практические результаты с приоритетом на мировом уровне:

- установлена природа и механизмы возникновения излучения в пористом кремнии [4, 5];

- разработаны интегральные светодиоды на пористом кремнии [6–8], излучающие в видимой части спектра и сохраняющие работоспособность рекордное время — 10000 ч непрерывной работы, и на его основе создана интегральная оптоэлектронная пара, включающая светодиод на пористом кремнии и кремниевый фотодиод, соединенные встроенным оптическим волноводом из Al_2O_3 [9–11], с временами отклика 2 нс и менее;

- разработана технология легирования пористого кремния редкоземельными элементами (Er, Tb, Eu) и обнаружено усиление люминесценции ионов этих элементов за счет присутствия пористого кремния [12–18]

- созданы интегральные волноводы на основе окисленного пористого кремния с рекордно низким на сегодняшний день уровнем оптических потерь для такого рода элементов – менее 0,1 дБ/см в видимом диапазоне и разработаны варианты их использования в кремниевых оптических платформах [19–23].

Одновременно с экспериментальными работами по пористому кремнию были начаты и получили развитие теоретические исследования фундаментальных электронных и оптических свойств наноразмерных структур из кремния (А.Б. Филонов, А.Н. Холод), которые позволили выявить следующие закономерности:

- квантовые шнуры из кремния обладают прямозонными свойствами только в случае их ориентации в направлении [100] при типичном поперечном сечении порядка 1 нм [24];

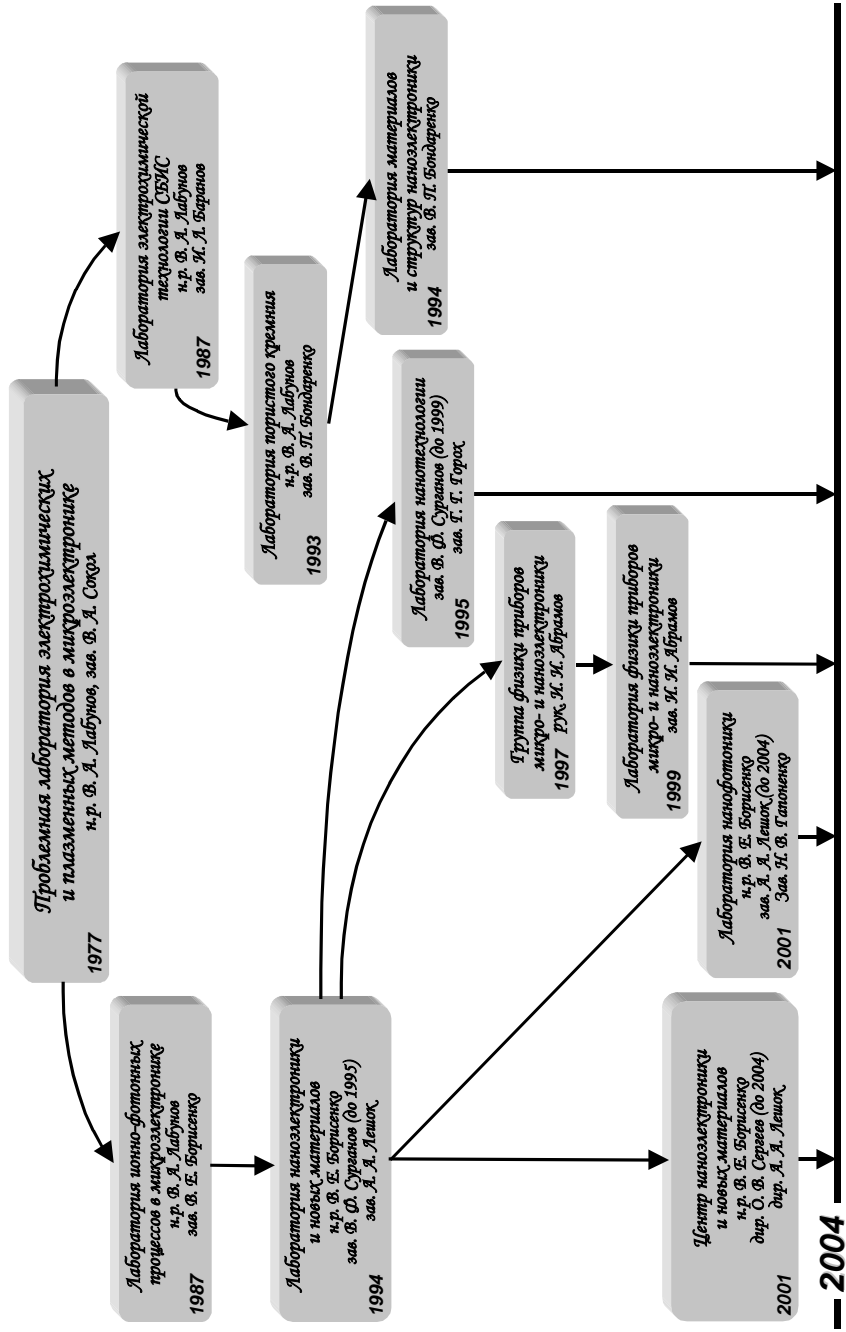


Рис. 1. Научно-исследовательские подразделения БГУИР, занимающиеся наноэлектроникой и нанотехнологией

– для проявления прямозонных свойств наноразмерный слой (111) кремния должен состоять из монокристаллических зерен, пассивированных водородом или кислородом [25–29], при этом ширина запрещенной зоны определяется квантовым ограничением и становится сравнимой с шириной запрещенной зоны объемного кремния при характерных размерах 2 нм и более.

Впоследствии (в конце 90-х годов) и наноструктуры из монокристаллического германия были теоретически исследованы на предмет закономерностей изменения их фундаментальных электронных свойств в зависимости от ориентации и размера. Установлено, что наноразмерные (100) монокристаллические пленки из этого полупроводника так же, как и в случае кремния, имеют четко выраженный прямозонный характер электронных энергетических зон [30, 31].

Результаты теоретического исследования фундаментальных электронных и оптических свойств кремниевых наноструктур позволили уже начиная со второй половины 90-х годов прошлого века начать работы по моделированию и экспериментальному исследованию переноса носителей заряда и электролюминесценции в квантоворазмерных структурах на основе кремния (А.Л. Данилюк, А.Н. Холод, Ю.А. Берашевич, С.Л. Прищепа, И.И. Абрамов). В ходе этих работ был обнаружен и исследован эффект памяти и появление отрицательного дифференциального сопротивления в квантовых колодцах, создаваемых в многослойных наноструктурах кремний/диэлектрик [32–38], где в качестве диэлектрика выступают CaF_2 или SiO_2 . Получила всестороннее теоретическое описание электролюминесценция в них [39, 40]. Разработаны принципы создания и предложены конструкции светоизлучающих, переключающих и запоминающих элементов интегральных микросхем на их основе [41–44]. В периодических наноструктурах сверхпроводник/спиновое стекло впервые обнаружены эффекты квантового плавления вихревой решетки [45, 46] и наличие π -фазы [47]. Проведено моделирование одноэлектронных структур, образуемых цепочкой металлических наноразмерных островков и матрицей туннельных переходов [48–51], и оценены возможности применения наноструктур $\text{Au}/\text{Al}_2\text{O}_3$, Ti/TiO_x , $\text{Cr}/\text{Cr}_2\text{O}_3$ в одноэлектронике.

Использование периодических Si/SiO_2 структур в качестве одномерных фотонных кристаллов позволило разработать на их основе интегральные оптические элементы обработки информации (направленный ответвитель, фильтр) [52, 53], отличающиеся повышенной селективностью и добротностью. Показано, что использование самоорганизованных монодисперсных глобул кремнезема, получаемых золь-гель методом [54–57], позволяет получить новый тип оптических материалов — твердотельные трехмерные фотонные кристаллы со свойственной им модифицированной плотностью фотонных состояний в оптическом диапазоне длин волн, что создает потенциальную возможность для разработки твердотельных люминесцентных структур с управляемыми характеристиками вынужденного и спонтанного излучения.

Наряду с работами по кремниевым наноструктурам значительные результаты достигнуты и при исследовании и использовании наноструктурированного пористого оксида алюминия (Al_2O_3). Особенностью этого материала является наличие в нем самоорганизующихся регулярно расположенных вертикальных пор, образующихся в процессе анодного электрохимического окисления алюминия. Размером и расположением пор можно управлять соответствующим выбором электролита и режима анодной обработки. В 70–80-х годах прошлого века на кафедре микроэлектроники (зав. В.А. Лабунов) был накоплен значительный опыт в получении, исследовании и применении анодного Al_2O_3 в микроэлектронике — для создания систем многоуровневых межсоединений, интегральных конденсаторов и резисторов, датчиков температуры и состава газовой среды и для других элементов интегральной микроэлектроники (подробнее об этом см. в обзорной статье В.А. Сокола).

В середине 90-х годов начаты активные работы по нанотехнологическому применению этого уникального природно-наноструктурированного материала. При этом исследования расширены в область получения наноконпозиционных структур на его основе. Наиболее значимые результаты в этом направлении достигнуты в Лаборатории нанотехнологии (В.Ф. Сурганов, Г.Г. Горох, А.М. Мозалев), Лаборатории нанофотоники (Н.В. Гапоненко, С.К. Лазарук), Лаборатории гибридных микросхем (В.А. Сокол, А.И. Воробьева), Лаборатории материалов и элементов электронной и сверхпроводниковой техники (Л.М. Лыньков, С.Л. Прищепа).

Путем анодного окисления пленок вентильных металлов (Ta, Nb, Ti) через поры в Al_2O_3 получены самоупорядоченные металло-оксидные наноструктуры, в которых локальные области оксида вентильного металла разделены промежутками неокисленного металла [58–64], что использовано для создания интегральных резисторов, сочетающих высокое удельное сопротивление (до 10^5 Ом/кв) с низким температурным коэффициентом сопротивления (10^{-6} K^{-1}). Осуществлено заполнение пор в анодном оксиде алюминия оксидом тантала путем ре-анодирования подслоя тантала и получена беспористая композиция наноструктурированных оксидов [65–70], позволяющая создавать электролитические конденсаторы и антикоррозионные покрытия с улучшенными свойствами. Созданы нанопористые проницаемые газовые мембраны [71] и сепараторы для литиевых батарей [72], отличающиеся высокой термостабильностью и механической прочностью. Впервые предложено использовать структуры Nb/пористый Al_2O_3 в качестве основы для элементов сверхпроводниковой микроэлектроники на основе вихревых процессов [73, 74].

Показано, что заполнение пор в Al_2O_3 органическим люминофором [75–77] и неорганическими зольями, содержащими редкоземельные элементы и обеспечивающими при последующей термообработке формирование композиционных оксидов в порах [78–89], позволяет создавать высокоэффективные фото- и электролюминесцентные структуры для видимого диапазона. Осаждением в поры металлов получены матрицы автоэмиссионных катодов [90, 91] с недостижимой другими методами плотностью расположения — 10^8 – 10^9 катодов на см^2 .

Закономерности формирования и свойства оксидных композиций в порах пористого анодного оксида алюминия и пористого кремния всесторонне проанализированы и обобщены в обзорах [92, 93] и монографии Н.В. Гапоненко [94].

Оригинальные технологические решения по формированию субмикронных пленочных структур с применением традиционных для микроэлектроники литографических процессов разработаны в Лаборатории материалов и элементов электронной и сверхпроводниковой техники (науч. рук. Л.М. Лыньков) [95, 96]. В их основе лежит использование локального объемного изменения рельефа тонких плёнок при их термообработке, что позволяет формировать пленочные элементы интегральных микросхем с латеральными размерами до 50 нм.

Одним из значимых достижений в области нанотехнологии является разработанный на кафедре химии (зав. И.В. Боднар) метод формирования силикатных стекол с наноразмерными (5–40 нм) частицами полупроводниковых соединений CuInX_2 ($X=\text{S}, \text{Se}, \text{Te}$) и твердых растворов $\text{CuInS}_{2x}\text{Se}_{2(1-x)}$, $\text{CuInSe}_{2x}\text{Te}_{2(1-x)}$. В проведенных исследованиях [97–107] показано, что такие стекла обладают улучшенными оптическими свойствами и позволяют создавать высококачественные абсорбционные фильтры для инфракрасной области спектра, пассивные затворы для импульсных неодимовых лазеров.

Начало нынешнего века, ознаменовано развитием отмеченных выше научных и технологических направлений, расширением области исследований и разработок по актуальным проблемам нанoeлектроники и нанотехнологии. Совместными усилиями специалистов нашего университета (Центр нанoeлектроники и новых материалов), Института механики металлополимерных систем НАН Беларуси (Гомель) и ПО "Интеграл" (Минск) на основе атомного силового микроскопа создан аналитико-технологический комплекс "Нанодизайнер", который позволяет формировать и исследовать элементы интегральных микросхем с размерами до 10 нм [108, 109]. Выполнен теоретический анализ закономерностей переноса носителей заряда через молекулу ДНК и предложена структура элементов цифровой обработки информации на ее основе [110, 111]. Развита оригинальный подход к организации квантовых вычислений, использующий эволюцию двухуровневых спиновых систем в резонансных полях с учетом непрерывных квантовых измерений, предложены механизмы функционирования логических элементов для квантовых вычислений [112–117]. Начата разработка методов и средств для организации самотестирующихся и саморемонтирующихся вычислительных систем с учетом специфики нанoeлектронных элементов обработки информации [118–121].

В деталях названные результаты представлены в других обзорах, помещенных в данный выпуск, а также в оригинальных статьях, на которые сделаны соответствующие ссылки. По спискам авторов в оригинальных статьях можно также легко оценить уровень международного сотрудничества при получении упомянутых результатов.

3. Подготовка специалистов с высшим образованием

Бурное развитие научных исследований и разработок по наноэлектронике стимулировало изменения и в учебных планах подготовки специалистов с высшим образованием в нашем университете. Так в 1996 г. в учебный план подготовки инженеров по специальности "Микроэлектроника" была введена и начала преподаваться новая университетская дисциплина "Наноэлектроника". Такая специализированная дисциплина введена впервые в международной практике университетского образования. В 1999–2000 гг. приглашенные лекции по этой дисциплине были прочитаны профессором В.Е. Борисенко студентам Средиземноморского университета (Марсель, Франция). Для самостоятельного изучения основ наноэлектроники подготовлены и изданы соответствующие учебные пособия [122–124]. Готовится издание учебника.

Следующий шаг был сделан в 2002 г. открытием и первым набором студентов на новую специальность "Квантовые информационные системы". Для этой специальности значительно расширен круг дисциплин, дающих фундаментальные знания и прикладные навыки в наноэлектронике и нанотехнологии. Это такие дисциплины, как "Физика низкоразмерных систем", "Молекулярная электроника", "Нанотехнология", "Квантовые вычисления". В 2003 г. традиционная для нашего университета специальность "Микроэлектроника" переименована в специальность "Микро- и наноэлектронные технологии и системы". Соответствующим образом усовершенствованы программы изучаемых в ее рамках дисциплин.

4. Подготовка специалистов высшей научной квалификации

Сведения о кандидатах наук, подготовивших и защитивших свои диссертации по актуальным проблемам наноэлектроники и нанотехнологии, представлены в хронологическом порядке в табл. 1. Все диссертации защищены в области физико-математических наук (ф.-м.н.) или технических наук (т.н.) по специальности 05.27.01 "Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах".

5. Научные программы и сотрудничество

Отдельные научно-исследовательские национальные и международные проекты в области наноэлектроники и нанотехнологии выполняются в нашем университете с начала 90-х годов прошлого века. Первой же успешной попыткой систематизировать эти работы, как в университете, так и в республике, стала Межуниверситетская программа фундаментальных и поисковых исследований "Наноэлектроника" (науч. рук. В.Е. Борисенко), сформированная нашим университетом в 1996 г. и затем выполнявшаяся в течение 1997–2000 гг. Ее главной целью было создание научных основ наноэлектроники, включающих физические принципы функционирования и перспективные конструкции элементов на квантово-размерных эффектах. В рамках программы финансировалось и успешно выполнено 13 проектов, в том числе 7 научными группами нашего университета под руководством И.И. Абрамова, В.Е. Борисенко, Н.В. Гапоненко, А.А. Кураева, В.А. Сокола, А.Б. Филонова, В.Н. Ярмолика. Полученные результаты в части понимания фундаментальных закономерностей электронных и оптических процессов в наноразмерных структурах образовали научный фундамент для последующих фундаментальных исследований и прикладных разработок. Углубление и расширение этих знаний осуществляется в выполняющейся сейчас Межуниверситетской программе фундаментальных и поисковых исследований "Наноэлектроника XXI" (2001–2005 гг., науч. рук. В.Е. Борисенко), целью которой является развитие научных основ наноэлектроники, включающих физические принципы функционирования и перспективные конструкции элементов на квантовых и размерных эффектах, физико-химические основы технологии создания наноэлектронных приборов и принципы построения интегрированных систем обработки информации на их основе. В ней финансируется 21 проект, 11 из них выполняется научными группами нашего университета (науч.рук. И.И. Абрамов, Ю.А. Берашевич, В.П. Бондаренко, В.Е. Борисенко, А.И. Воробьева, Н.В. Гапоненко, А.Л. Данилюк, С.К. Лазарук, С.Л. Прищепа, В.Л. Шапошников, В.Н. Ярмолик).

Таблица 1. Кандидатские диссертации, защищенные по проблемам, связанным с нанoeлектроникой и нанотехнологией

Год защиты	Автор, (научный руководитель)	Название диссертации
1998	А.Н. Холод (В.Е. Борисенко)	Электронные и оптические свойства наноразмерных кремниевых кластеров и пленок (ф.-м.н.)
1999	Е.Г. Новик (И.И. Абрамов)	Моделирование металлических одноэлектронных транзисторов (ф.-м.н.)
2000	А.А. Лешок (В.Е. Борисенко, С.К. Лазарук)	Формирование и люминесцентные свойства ансамблей нанокристаллических частиц кремния (ф.-м.н.)
2001	П.В. Жагино (С.К. Лазарук)	Формирование и свойства пористого кремния и лавинных светоизлучающих структур на его основе (т.н.)
2001	О.В. Сергеев (Н.В. Гапоненко)	Светоизлучающие микроструктуры на основе эрбий-, тербий- и европий-содержащих покрытий, формируемых золь-гель методом (т.н.)
2002	Ю.А. Берашевич (В.Е. Борисенко)	Перенос носителей заряда и электролюминесценция в наноразмерных периодических структурах кремний/диэлектрик (ф.-м.н.)
2002	А.А. Позняк (В.Ф. Сурганов, Л.М. Лыньков)	Формирование модифицированного анодного оксида алюминия для светоизлучающих структур (ф.-м.н.)
2002	А.М. Прудник (Л.М. Лыньков)	Формирование субмикронного рельефа тонких пленок обратной литографией с использованием металлических оксидных масок (т.н.)
2002	С.А. Волчек (В.А. Петрович, В.П. Бондаренко)	Катодные процессы в эрбийсодержащих растворах и разработка технологии легирования эрбием интегральных волноводов и светодиодов на основе пористого кремния (ф.-м.н.)
2003	В.В. Шушунова (В.Е. Борисенко, Н.В. Гапоненко)	Фотонные кристаллы на Si/SiO ₂ периодических структурах и интегральные оптические элементы на их основе (ф.-м.н.)
2003	С.А. Игнатенко (И.И. Абрамов)	Моделирование многоостровковых структур, функционирующих на эффекте одноэлектронного туннелирования (ф.-м.н.)
2003	И.С. Молчан (Н.В. Гапоненко)	Оптические свойства европий- и тербийсодержащих оксидных пленок, сформированных золь-гель методом в пористом анодном оксиде алюминия (ф.-м.н.)

Результаты выполненных фундаментальных исследований сегодня успешно используются и развиваются при реализации заданий ряда Государственных программ фундаментальных исследований ("Электроника", "Вещество" и другие), а также в Государственной программе ориентированных фундаментальных исследований "Наноматериалы и нанотехнологии". Созданный с участием специалистов Центра нанoeлектроники и новых материалов аналитико-технологический комплекс "Нанодизайнер" в рамках государственной научно-технической программы "Белoeлектроника" в 2003 г. внедрен на ПО "Интеграл".

Ряд актуальных научных проблем нанoeлектроники и нанотехнологии решался и решается специалистами нашего университета в рамках международных проектов. Наиболее значимые из них приведены в табл. 2. Кроме этого имеется несколько десятков двухсторонних договоров о научно-техническом сотрудничестве, поддерживающих и координирующих совместные исследования.

Важной составной частью международного сотрудничества являются проводимые с 1995 г. в Минске Международные конференции по физике, химии и применению наноструктур "Nanomeeting", организатором которых традиционно выступает Центр нанoeлектроники и новых материалов нашего университета. К сегодняшнему дню их уже проведено пять — в 1995, 1997, 1999, 2001 и 2003 гг. Изданные труды этих конференций [125, 126] содержат наряду с обзорными докладами приглашенных ведущих мировых специалистов по рассматриваемым проблемам и результаты оригинальных разработок белорусских ученых, со значительным участием нашего университета, выполненных в сотрудничестве с зарубежными коллегами.

Таблица 2. Международные проекты

Годы	Программа	Название проекта (руководитель работ от БГУИР)	Страны-партнеры
1994-1995	NATO	Lift-off submicrometer lithography using refractory metal layers for HTSC films (Л. С. Прищеп)	Италия
1996-1998	INTAS	High-frequency dynamics in discrete and continuous superconducting Josephson systems (Л. С. Прищеп)	Италия, Германия, Дания, Франция, Греция, Россия, Украина
1997-1999	INTAS	Magnetic structures, nanostructures and magnetic membranes (В. Ф. Сурганов)	Дания, Россия
1998-2000	ESPRIT	Silicon modules for integrated light engineering (В. Е. Борисенко)	Франция, Италия, Греция
1998-2000	ESPRIT	Optical link in silicon (В. П. Бондаренко)	Италия, Франция, Нидерланды
1998-2000	Kanagawa Industrial Technology Research Institute	Novel separator for Li rechargeable batteries made from nanoporous anodic aluminum oxide (А.Н. Мозалев)	Япония
1998-2001	INCO-COPERNIKUS	Silicon based light emitting diodes for optical interconnects (С. К. Лазарук)	Италия, Швеция, Англия, Россия, Украина, Румыния
1999-2001	INTAS	Synthesis and investigation of composite three-dimensional structures for photonic applications (Н. В. Гапоненко)	Германия, Франция
2003-2004	INTAS	Charge carrier transport and recombination processes in Si/SiC, Ge/SiC heterostructures and Si/Si-SiC (Ю. А. Берашевич)	Франция
2003-2006	МНТЦ	Mesoscopic light emitters, scatters and transformers (Н. В. Гапоненко)	Германия, Италия

Заключение

Нанoeлектроника и нанотехнология в нашем университете, начавшие формироваться в качестве самостоятельных научных направлений, как и во всем мире, в начале 90-х годов прошлого века, сегодня представляют собой динамично развивающиеся отрасли науки и техники. Достижения наших ученых отмечены не только новыми знаниями в понимании процессов и явлений, происходящих в наном мире, но и практическими разработками мирового уровня. Активная подготовка и защита кандидатских диссертаций, подготовка специалистов с высшим образованием по специальностям "Микро- и нанoeлектронные технологии и системы" и "Квантовые информационные системы" обеспечивают постоянный приток свежих молодых умов в эти актуальные направления развития науки и техники, обеспечивающие информационные возможности современного общества. Эффективное использование этого мощного потенциала требует повышения уровня финансирования научных программ и расширения международного сотрудничества по нанoeлектронике и нанотехнологиям.

Выражаю благодарность В. А. Лабунову за обсуждение данного обзора и критические замечания, способствовавшие его совершенствованию. Я искренне признателен коллегам, оказавшим содействие в подготовке данного обзора: И. В. Боднарю, В. П. Бондаренко, А. И. Воробьевой, Н. В. Гапоненко, Г. Г. Гороху, А. Л. Данилюку, С. А. Игнатенко, С. К. Лазаруку, Л. М. Лынькову, С. Л. Прищепе, В. А. Соколу, А. Б. Филонову, А. Н. Холоду, В. Н. Ярмолику – за материалы с информацией об основных результатах своей научной деятельности; Л. С. Становой — за помощь в представлении исторических аспектов формирования организационной структуры исследований по нанoeлектронике и нанотехнологии в БГУИР.

NANOELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY IN BELARUSIAN STATE UNIVERSITY OF INFORMATICS AND RADIOELECTRONICS: FROM THE FIRST STEPS TO THE CURRENT DAY

V.E. BORISENKO

Abstract

The main steps in the development of nanoelectronics and nanotechnology in BSUIR are shown. They cover presentation of the research laboratories involved and their results, high education and PhD theses, research programs and international cooperation.

Литература

1. *Борисенко В.Е., Абрамов И.И., Филонов А.Б.* Наноэлектроника в Беларуси: концепция развития и подготовка специалистов // Адукацыя і выхаванне. 1996. № 4. С. 58–70.
2. *Борисенко В.Е.* Наноэлектроника – основа информационных систем XXI века // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 5. С. 100–104.
3. *Canham L.T.* Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers // Appl. Phys. Lett. 1990. Vol. 57, № 10. PP. 1046–1048.
4. *Bondarenko V.P., Borisenko V.E., Dorofeev A.M., Germanenko I.N., Gaponenko S.V.* Spectral characteristics of visible light emission from porous silicon: Quantum confinement or impurity effect // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 75, № 5. PP. 2727–2729.
5. *Лешок А.А., Германенко И.Н., Гапоненко С.В., Борисенко В.Е.* Фотолюминесцентные свойства полимерных композиций с пористым кремнием // Журн. прикл. спект. 1994. Т. 61, № 3–4. С. 237–240.
6. *Lazarouk S., Jaguiro P., Katsouba S., Masini G., La Monica S., Maiello G., Ferrari A.* – Stable electroluminescence from reverse biased n-type porous silicon–aluminum Schottky junction device // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 68, P. 2108–2110.
7. *Lazarouk S.K., Jaguiro P.V., Borisenko V.E.* Avalanche porous silicon light emitting diodes for optical intra-chip interconnects, in: Microelectronics, Microsystems and Nanotechnology, edited by A. G. Nassiopoulou, X. Zianni // World Scientific, Singapore. 2001. P. 41–44.
8. *Лазарук С.К., Жагуро П.В., Лешок А.А., Борисенко В.Е.* Физические явления в лавинных фотодиодах на основе пористого кремния. // Изв. РАН. Сер. физическая. 2002. Т. 66, № 2. С. 178–182.
9. *Lazarouk S., Jaguiro P., Borisenko V.* Integrated optoelectronic unit based on porous silicon // Phys. Stat. Sol. (a) 1998. Vol. 165, № 1. P. 87–90.
10. *Lazarouk S.K., Leshok A.A., Borisenko V.E., et al.* On the route to Si-based interconnects // Microelectronic Engineering. 2000. Vol. 50, №1–4. P. 81–86.
11. *Lazarouk S.K., Jaguiro P.V., Leshok A.A., Borisenko V.E.* Reverse biased porous silicon light-emitting diodes for optical intra-chip interconnects // Physica E. 2003. Vol. 16. P. 495–498.
12. *Dorofeev A.M., Gaponenko N.V., et al.* Erbium luminescence in porous silicon doped from spin-on films // J. Appl. Phys. 1995. Vol. 77, № 6. P. 2679–2683.
13. *Dorofeev A., Bachilo E., Bondarenko V., et al.* Strong 1.54 μm luminescence from erbium doped porous silicon // Thin Solid Films. 1996. Vol. 276, № 1. P. 171–174.
14. *Gaponenko N.V., Mudryi A.V., Sergeev O.V., et al.* Erbium and terbium luminescence from sol-gel derived In_2O_3 films on porous silicon // Phys. Stat. Sol. (a) 1997. Vol. 165, № 1. P. 131–134.
15. *Stepikhova M., Palmetshofer L., Jantsch W., et al.* 1.5 μm infrared photoluminescence phenomena in Er-doped porous silicon // Appl. Phys. Lett. 1999. Vol. 74, № 4. P. 537–539.
16. *Gaponenko N.V., Mudryi A.V., Sergeev O.V., et al.* On the origin of 1.5 μm luminescence in porous silicon coated with sol-gel derived erbium doped Fe_2O_3 films // J. Luminescence. 1999. Vol. 80, № 1–4. P. 399–403.
17. *Bondarenko V., Vorozov N., Dolgyi L., et al.* Formation and luminescent properties of oxidized porous silicon doped with erbium by electrochemical procedure // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1999. Vol. 536. P. 69–74.
18. *Pivin J.C., Gaponenko N.V., Mudryi A.V., et al.* Photoluminescence of Er-implanted silica, polysiloxane and porous silicon films // Mater. Sci. Eng. B. 2001. Vol. 69–70. P. 215–218.
19. *Bondarenko V., Varichenko V., Dorofeev A., et al.* Integrated optical waveguide fabricated with porous silicon // Tech. Phys. Lett. 1993. Vol. 19. P. 463–465.
20. *Bondarenko V. and Yakovtseva V.* Optoelectronics using porous silicon // Properties of Porous Silicon / L. Canham (ed.). IEE Books, EMIS Datareviews Series. 1997. № 18. P. 356–363.
21. *Lopez H., Chan S., Tsubeskov L., et al.* Integration of multilayers in Er-doped porous silicon structures and advances in 1.5 μm optoelectronic devices // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1999. Vol. 536. P. 135–140.

22. Бондаренко В.П., Яковцева В.А., Долгий Л.Н., и др. Легированный эрбием окисленный пористый кремний для интегральных оптических волноводов // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25, № 17. С. 69–73.
23. Balucani M., Bondarenko V., Lamedica G., Ferrari A., Dolgyi L., Vorozov N., Yakovtseva V., Volchek S., Petrovich V., Kazuchits N. Er-doped oxidized porous silicon waveguides // Thin Solid Films. 2001. Vol. 396. P. 201–203.
24. Filonov A.B., Petrov G.V., Novikov V.A., and Borisenko V.E. Orientation effect in electronic properties of silicon wires // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 67, № 8. P. 1090–1091.
25. Filonov A.B., Kholod A.N., Novikov V.A., et al. Grain interaction effect in electronic properties of silicon nanosize films // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 70, № 6. P. 744–746.
26. Холод А.Н., Филонов А.Б., Борисенко В.Е. Изменение электронных свойств нанокристаллического кремния при формировании в нем межзеренных границ // Доклады Академии наук Беларуси. 1997. Т. 41, № 4. С. 58–61.
27. Filonov A.B., Kholod A.N., Borisenko V.E. Electronic properties of nanosize silicon-oxygen clusters // Phys. Stat. Sol. (a) 1998. Vol. 165, № 1. P. 57–61.
28. Filonov A.B., Kholod A.N., Borisenko V.E., et al. Oxygen effect in optical properties of nanosize silicon clusters // Phys. Rev. B. 1998. Vol. 57, № 3. P. 1394–1397.
29. Filonov A.B., Kholod A.N., Borisenko V.E., et al. Grain effect in electronic properties of silicon epitaxial nanostructures // Comp. Mat. Sci. 1998. Vol. 10, №1–4. P. 148–153.
30. Kholod A.N., Saül A., Fuhr J., et al. Electronic properties of germanium quantum films // Phys. Rev. 2000. Vol. 62, № 19. P. 12949–12954.
31. Kholod A.N., Borisenko V.E., Saül A., et al. Appearance of direct gap in silicon and germanium nanosize slabs // Optical Materials. 2001. Vol. 17, № 1. P. 61–63.
32. Kholod A.N., Borisenko V.E., Zaslavsky A., Arnaud d'Avitaya F. Current oscillations in semiconductor-insulator multiple quantum wells // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 60, № 23. P. 15975–15979.
33. Ménard S., Liniger M., Bassani F., et al. Vertical electrical transport in Si/CaF₂ nanocrystalline heterostructures // Mat. Sci. Eng. B Solid State Mat. Adv. Technol. 2000. Vol. 69–70. P. 464–467.
34. Берашевич Ю.А., Данилюк А.Л., Борисенко В.Е. Активационный транспорт в периодических структурах Si/CaF₂ // Изв. Белорус. инж. акад. 2000. Т. 1, № 9/2. С. 51–53.
35. Ménard S., Kholod A.N., Liniger M., et al. Charge carrier transport in Si/CaF₂ heterostructures controlled by forming bias // Phys. Stat. Sol. (a) 2000. Vol. 181, № 2. P. 561–568.
36. Berashevich Yu.A., Danilyuk A.L., Kholod A.N., Borisenko V.E. Charge-carrier transport in nanometer-sized periodic Si/CaF₂ structures with participation of traps // Semiconductors. 2001. Vol. 35, № 1. P. 112–116.
37. Liniger M., Kholod A.N., Ménard S., et al. Carrier dynamics modelling in a precharged Si/CaF₂ heterostructure // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 89, № 11. P. 6281–6284.
38. Берашевич Ю.А., Данилюк А.Л., Холод А.Н., Борисенко В.Е. Зарядовые эффекты, контролирующие токовый гистерезис и отрицательное дифференциальное сопротивление в периодических наноразмерных структурах Si/CaF₂ // Физика и техника полупроводников. 2002. Т. 36, № 1. С. 91–96.
39. Borisenko V.E., Danilyuk A.L., Kholod A.N. Electroluminescence from nanometer-sized layered silicon structures // Russian Microelectronics. 1998. Vol. 27, № 4. P. 233–239.
40. Kholod A.N., Danilyuk A.L., Borisenko V.E., et al. Electroluminescence simulation of multi-quantum well silicon structures // J. Appl. Phys. 1999. Vol. 85, № 10. P. 7219–7223.
41. Берашевич Ю.А., Каменев Б.В., Борисенко В.Е. Инжекционное возбуждение люминесценции в многослойных структурах nc-Si/диэлектрик // Физика и техника полупроводников. 2002. Т. 36, № 2. С. 221–226.
42. Берашевич Ю.А., Королев А.В., Данилюк А.Л., Борисенко В.Е. Элемент памяти на периодических наноразмерных Si/CaF₂ структурах // Журн. технической физики. 2003. Т. 73, № 1. С. 67–72.
43. Berashevich J.A., Danilyuk A.L., Kholod A.N., Borisenko V.E. Carrier transport and related phenomena in nanosize periodic silicon/insulator structures // Materials Science and Engineering. 2003. Vol. B101, № 1. P. 111–118.
44. Berashevich J.A., Danilyuk A. L., Borisenko V. E. Digital devices based on tunnel-resonant transport of charge carriers in periodic Si/CaF₂ nanostructures // Materials Science and Engineering. 2003. Vol. B101, № 1. P. 300–304.
45. Attanasio C., Maritato L., Prischepa S.L., Salvato M. Quantum vortex melting in Nb/CuMn multilayers // Phys. Rev. B. 1996. Vol. 53, № 3. P. 1087–1090.
46. Armenio A.A., Attanasio C., Prischepa S.L., et al. Evidence of vortex kink formation in antidotted superconductors // Phys. Rev. B. 2002. Vol. 65, № 21. P. 212503(4).
47. Attanasio C., Mercaldo L.V., Prischepa S.L., et al. Critical-temperature oscillations dependence on Mn concentration in superconducting Nb/CuMn multilayers // Phys. Rev. B. 1998. Vol. 57, № 22. P. 14411–14415.
48. Абрамов И.И., Новик Е.Г. Численное моделирование металлических одноэлектронных транзисторов. Мн.: Бестпринт. 2000.

49. *Абрамов И.И., Игнатенко С.А., Новик Е.Г.* Влияние параметров конструкции и материалов на вольт-амперные характеристики двухостровковых одноэлектронных цепочек // ФТП. 2002. Т. 36, № 10. С. 1272–1277.
50. *Абрамов И.И., Игнатенко С.А., Новик Е.Г.* Модель многоостровковых одноэлектронных цепочек на основе метода Монте-Карло // ФТП. 2003. Т. 37, № 5. С. 583–587.
51. *Абрамов И.И., Игнатенко С.А., Новик Е.Г.* Характеристики многоостровковых одноэлектронных цепочек в зависимости от различных факторов // ФТП. 2003. Т. 37, № 10. С. 1231–1234.
52. *Шушунова В.В., Свило М., Яскоржинска Б., Куу М., Телен Л.* Оптический канальный волновод на основе одномерной решетки Брэгга // Изв. Белорус. инж. акад. 2002. Т. 2, № 14/2. С. 8–10.
53. *Шушунова В.В., Свило М., Яскоржинска Б., Куу М., Телен Л.* Выделение оптических мод в ответвителе на основе одномерной решетки Брэгга // Журн. прикл. спектр. 2003. Т. 70, № 2. С. 265–268.
54. *Bogomolov V.N., Gaponenko S.V., Germanenko I.N., et al.* Photonic band gap phenomenon and optical properties of artificial opals // Phys. Rev. E. 1997. Vol. 55. P. 7619–7625.
55. *Kapitonov A.M., Gaponenko N.V., Bogomolov V.N., Prokofiev A.V., Samoilovich S.M., Gaponenko S.V.* Photonic stop band in a three-dimensional SiO₂/TiO₂ lattice // Phys. Stat. Sol. (a) 1998. Vol. 165. P. 119–122.
56. *Шушунова В.В., Яроцкий Д.А., Капитонов А.М., Гапоненко Н.В.* Синтез трехмерных фотонных кристаллов и их свойства // Изв. Белорус. инж. акад. 1998. Т. 2, № 6/2. С. 110–112.
57. *Rogach O.E, Kornowski A., Kapitonov A.M., et al.* Self-organization of uniform silica globules into the three-dimensional superlattice of artificial opals // Mater. Sci. Eng. B. 1999. Vol. 64. P. 64–67.
58. *Surganov V.F., Mozalev A.M., Lastochkina V.A.* Investigation of the Composition of Periodic Nanoscale Column Structures of Tantalum Anodic Oxide by the Method of IR Spectroscopy // J. Appl. Spectrosc. 1998. Vol. 65. P. 850–856.
59. *Surganov V.F., Mozalev A.M., Tatarenko N.I., Lastochkina V.A.* Investigation of the Composition of the Periodic Nano-Dimensional Column Structures of the Anodic Titanium Oxide by the Method of IR Spectroscopy // J. Appl. Spectrosc. 1998. Vol. 65. P. 200–204.
60. *Mozalev A., Surganov A., Magaino S.* Anodic Process for Forming Nanostructured Metal-Oxide Coatings for Large-Value Precise Microfilm Resistor Fabrication // Electrochim. Acta. 1999. Vol. 44. P. 3891–3898.
61. *Воробьева А.И., Москвичев К.В.* МСМ-D интегральные резисторы. Процесс изготовления и основные характеристики // Микроэлектроника. 2000. Т. 29, № 6. С. 417–425.
62. *Surganov V., Mozalev A., Lastochkina V.* IR Spectroscopic Study of Nanoscale Column Anodic Tantalum Oxides Formed in Sulphuric Acid Electrolyte // J. Appl. Spectrosc. 2000. Vol. 67. P. 301–305.
63. *Tatarenko N., Mozalev A.* Geometry and element composition of a nanoscale field emission array formed by self-organization in porous anodic aluminum oxide // Solid-State Electron. 2001. Vol. 45, № 6. P. 1009–1016.
64. *Mozalev A., Sakairi M., Saeki I., Takahashi H.* Nucleation and Growth of the Nanostructured Anodic Oxides on Tantalum and Niobium Under the Porous Alumina Film // Electrochim. Acta. 2003. Vol. 48. P. 3155–3170.
65. *Vorobyova A.I., Outkina E.A.* Study of pillar microstructure formation with anodic oxides // Thin Solid Films. 1998. Vol. 324. P. 1–10.
66. *Vorobyova A.I., Sokol V.A., Outkina E.A.* SEM investigation of pillared microstructures formed by electrochemical anodization // Applied Physics A. 1998. Vol. 67. P. 487–492.
67. *Mozalev A., Sakairi M., Takahashi H.* Applications of anodically oxidized double-layer valve-metal combinations in microelectronics // Proc. 18th Natl. Conf. Japan's Anodizing Research Society (18th ARS). 8–9 Nov. 2001. Osaka, Japan. P. 55–59.
68. *Mozalev A., Sakairi M., Takahashi H.* The Formation of Nanostructured Ta-Al Oxide Films and Their Application to Electrolytic and Thin-Film Capacitors // Proc. 105th Annual Meet. Surf. Finish. Soc. Jpn. 13–14 March 2002. Hitachi, Japan. P. 23–24.
69. *Mozalev A., Gorokh G., Sakairi M., Takahashi H.* Anodic Formation of Non-Porous Tantalum-alumina Dielectrics for Electrolytic and Thin-film Capacitors // Изв. Белорус. инж. акад. 2003. Т. 1, № 15/4. С. 23–25.
70. *Mozalev A., Sakairi M., Takahashi H.* Structure, Morphology, and Dielectric Properties of Nanocomposite Oxide Films Formed by Anodizing of Sputter-Deposited Ta-Al Bilayers // J. Electrochem. Soc. 2003.
71. *Surganov V., Gorokh G.* Nanoporous aluminium anodic oxide membrane // Physics, Chemistry and Application of Nanostructures / V. E. Borisenko et al. (eds.). 1997. Singapore, World Scientific. P. 306–308.
72. *Mozalev A., Magaino S., Imai H.* The formation of nanoporous membranes from anodically oxidized aluminium and their application to Li rechargeable batteries // Electrochim. Acta. 2001. Vol. 46, № 18. P. 2825–2834.
73. *Prischepa S.L., Lynkov L.M., Lykov A.N., Dediu V.I.* Porous anodic Al₂O₃ layers for superconducting films // Cryogenics 1994. Vol. 34. P. 851–853.
74. *Лынькоу Л.М., Прышчэпа С.Л., Семянюко Л.В.* Магчымасць прымянення анодных аксідных слаёў алюмінію для стварэння звышправодных віхравых структур // Весці АН Беларусі, сер. фіз.-мат. навук. 1992. № 1. С.87-91.
75. *Горох Г.Г., Кухто А.В., Кошин Ю.А.* Органические светоизлучающие приборы на основе матрицы анодного оксида алюминия // Изв. Белорус. инж. акад. 2001. Т. 1, № 11/3. С. 10–12.

76. Kukhta A.V., Gorokh G.G., Kolesnik E.E., et al. Nanostructured alumina as a cathode of organic light-emitting devices // *Surface Science*. 2002. Vol. 507–510. P.593–597.
77. Горох Г.Г., Мозалев А.М., Кухто А.В., и др. Исследование взаимодействия органических люминофоров с модифицированной пористой матрицей анодного оксида алюминия // *Изв. Белорус. инж. акад.*. 2003. Т. 1, № 15/4. С. 17–19.
78. Gaponenko N.V., Parkun V.M., Katernoga O.S., et al. Erbium and terbium photoluminescence in silica sol-gel films on porous alumina // *Thin Solid Films*. 1997. Vol. 297. № 1. P. 202–206.
79. Гапоненко Н.В., Мудрый А.В., Паркун В.М., и др. Фотолюминесценция эрбия в пленках силикагелей на пористом оксиде алюминия // *Неорганические материалы*. 1997. Т. 33, № 9. С. 1082–1086.
80. Lazarouk S.K., Muryi A.V., Borisenko V.E. Room-temperature formation of erbium-related centers in anodic alumina // *Appl. Phys. Lett.* 1998. Vol. 73, № 16. P. 2272–2274.
81. Сергеев О.В., Гапоненко Н.В., Борисенко В.Е., и др. Фото- и катодолюминесценция тербия в ксерогеле оксида титана, сформированном в порах анодного оксида алюминия // *Изв. Белорус. инж. акад.* 2000. Т. 1, № 9/2. С. 5–8.
82. Gaponenko N.V., Davidson J.A., Hamilton B., et al. Strongly enhanced Tb luminescence from titania xerogel solids mesoscopically confined in porous anodic alumina // *Appl. Phys. Lett.* 2000. Vol. 76, № 8. P. 1006–1008.
83. Gaponenko N.V., Sergeev O.V., Stepanova E.A., Parkun V.M., Mudryi A.V., Gnaser H., Misiewicz J., Heiderhoff R., Balk L.J., Thompson G.E. Optical and structural characterisation of erbium-doped TiO₂ xerogel films processed on porous anodic alumina // *J. Electrochem. Soc.* 2001. Vol. 148, № 2. P. H13–H16.
84. Gaponenko N.V., Molchan I.S., Sergeev O.V., et al. Enhancement of green terbium-related photoluminescence from highly doped microporous alumina xerogels in mesoporous anodic alumina // *J. Electrochem. Soc.* 2002. Vol. 149, № 2. P. H49–H52.
85. Kudrawiec R., Misiewicz J., Bryja L., et al. Photoluminescence investigation of porous anodic alumina with spin-on europium-containing titania sol-gel films // *J. Alloys Comp.* 2002. Vol. 341. P. 211–213.
86. Gaponenko N.V., Molchan I.S., Thompson G.E., et al. Photoluminescence of Eu-doped titania xerogel spin-on deposited on porous anodic alumina // *Sensors and Actuators A*. 2002. Vol. 99. P. 71–73.
87. Molchan I.S., Gaponenko N.V., Kudrawiec R., et al. Visible luminescence from europium-doped alumina sol-gel derived films confined in porous anodic alumina // *J. Alloys Comp.* 2002. Vol. 341. P. 251–254.
88. Лазарук С.К., Лешок А.А., Борисенко В.Е. Электролюминисцентные структуры на основе кремниевых наночастиц, встроенных в анодный оксид алюминия // *Изв. РАН. Сер. физическая*. 2003. Т. 67, № 2. С. 178–180.
89. Гапоненко Н.В., Молчан И.С., Гапоненко С.В., и др. Об увеличении интенсивности люминесценции ионов Eu³⁺ и Tb³⁺ в структуре микропористый ксерогель/мезопористый анодный оксид алюминия // *Журн. прикл. спектр.* 2003. Т. 70, № 1. С. 57–61.
90. Sokol V.A., Kurayev A.A., Snitsyn A.K., Grinis L.M. Fabrication and performance simulation of nanodimensional matrix field-emission cathodes // *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures / V. E. Borisenko et al. (eds.)*. 1999. P. 280–286.
91. Sarganov V.F., Gorokh G.G. Array of niobium nanotips formed in porous anodic alumina matrix // *SPIE*. 2000. Vol. 4019. P. 526–530.
92. Gaponenko N.V. Sol-gel derived films in mesoporous matrices: porous silicon, anodic alumina and artificial opals // *Synthetic Metals*. 2001. Vol. 124, № 1. P. 125–130.
93. Гапоненко Н.В. Синтез и оптические свойства пленок, сформированных золь-гель методом в мезопористых матрицах // *Журн. прикл. спектр.* 2002. Т. 69, № 1. С. 5–21.
94. Гапоненко Н.В. Пленки, сформированные золь-гель методом на полупроводниках и в мезопористых матрицах. Мн.: Беларуская навука, 2003.
95. Лыньков Л.М., Прищепя С.Л. Субмикронная литография. Мн.: БГУИР, 1999.
96. Лыньков Л.М., Мухуров Н.И. Микроструктуры на основе анодной алюмооксидной технологии. Мн.: Бестпринт, 2002.
97. Боднарь И.В., Молочко А.П., Соловей Н.П. Оптические свойства силикатных стекол, активированных тройными полупроводниковыми соединениями CuInS₂ и CuInSe₂ // *Неорганические материалы*. 1993. Т. 29, № 9. С. 1226–1228.
98. Юмашев К.В., Михайлов В.П., Боднарь И.В. и др. Пассивная синхронизация мод неодимовых лазеров с помощью стекол с микрокристаллами CuInS_{2x}Se_{2(1-x)} // *Квантовая электроника*. 1993. Т. 20, № 9. С. 890–892.
99. Юмашев К.В., Михайлов В.П., Боднарь И.В. и др. Кинетика просветления и наведенного поглощения в стеклах с микрокристаллами CuInS_{2x}Se_{2(1-x)} // *Квантовая электроника*. 1993. Т. 20, № 9. С. 893–898.
100. Боднарь И.В., Молочко А.П., Соловей Н.П. Оптические свойства силикатных стекол, активированных твердыми растворами CuInS_{2x}Se_{2(1-x)} // *Неорганические материалы*. 1995. Т. 31, № 8. С. 1030–1032.
101. Боднарь И.В., Молочко А.П., Соловей Н.П. Влияние химического состава матрицы на спектры пропускания стекол, активированных CuInS₂ // *Журн. прикл. спектр.* . 1996. Т. 63, № 2. С. 264–268.

102. Боднаръ И.В., Молочко А.П., Соловей Н.П., Гурин В.С. Природа центров окраски в силикатных стеклах, активированных $\text{CuInS}_{2x}\text{Se}_{2(1-x)}$ // Неорганические материалы. 1997. Т. 33, № 1. С. 23–26.
103. Гуринович Л.И., Гурин В.С., Иванов В.А., и др. Оптические свойства наночастиц CuInS_2 в области фундаментального края поглощения // ЖПС. 1998. Т. 65, № 3.
104. Gurinovich L.I., Gurin V.S., Ivanov V.A., et al. Crystal Structure and Optical Properties of CuInS_2 Nanocrystals in a Glass Matrix // Phys. Stat. Sol. (a) 1998. Vol. 208, № 2. P. 533–540.
105. Боднаръ И.В., Молочко А.П., Соловей Н.П. Оптические свойства силикатных стекол, активированных соединениями CuInSe_2 , CuInTe_2 и твердыми растворами $\text{CuInSe}_{2x}\text{Te}_{2(1-x)}$ // Журн. прикл. спектр. 2000. Т. 67, № 1. С. 132–134.
106. Боднаръ И.В., Гурин В.С., Молочко А.П., Соловей Н.П., Прокошин В.В., Юмашев К.В. Оптические свойства и структура ультрадисперсных частиц $\text{CuInSe}_{2x}\text{Te}_{2(1-x)}$ в матрице силикатного стекла // Журн. прикл. спектр. . 2000. Т. 67, № 3. С. 350–354.
107. Боднаръ И.В., Молочко А.П., Соловей Н.П. Влияние условий синтеза и термообработки на оптические свойства стекол, активированных CuInS_2 и $\text{CuInS}_{1,2}\text{Se}_{0,8}$ // Неорганические материалы. 2000. Т. 36, № 12. С. 1527–1531.
108. Сергеев О.В., Лазарева Н.Г., Козлов А.М., и др. Нанолитография и локальное формирование оксида кремния с применением сканирующей зондовой микроскопии // Изв. Белорус. инж. акад. 2001. Т. 1, № 11/3. С. 38–42.
109. Лазарева Н.Г., Сергеев О.В., Емельянов В.А., Пономарь В.Н., и др. Физико-химические основы нанолитографии, проводимой с помощью атомного силового микроскопа // Новые технологии изготовления многокристалльных модулей. Мн., БГУИР, 2002. С. 23–27.
110. Новик Н.В., Берашевич Ю.А., Борисенко В.Е. Возможности применения молекулы ДНК в качестве переключающего элемента // Докл. БГУИР. 2003. Т. 1, № 2. С. 20–28.
111. Берашевич Ю.А., Новик Н.В., Борисенко В.Е. Молекула ДНК как элемент информационных технологий. Микроэлектроника. 2004.
112. Данилюк А.Л., Подрябинкин Д.А. Эволюция двухуровневой спиновой системы в резонансном периодическом поле // Изв. Белорус. инж. акад.. 2001. Т. 1, № 11/3. С. 69–71.
113. Данилюк А.Л., Подрябинкин Д.А. Модели логических спиновых элементов для квантовых вычислений // Изв. Белорус. инж. акад.. 2001. Т. 1, № 11/3. С. 66–68.
114. Данилюк А.Л., Борисенко В.Е. Модель и логические элементы для квантовых вычислений на двухуровневой системе в резонансном периодическом поле // Микроэлектроника. 2002. Т. 31, № 2. С. 135–141.
115. Данилюк А.Л., Подрябинкин Д.А., Борисенко В.Е. Модель и логические элементы для квантовых вычислений на спиновых системах в резонансных полях // Электромагнитные волны и электронные системы. 2002. Т. 7, № 3. С.67–72.
116. Королев А.В., Данилюк А.Л. Универсальный квантовый гейт на периодических структурах кремний/диэлектрик // Изв. Белорус. инж. акад.. 2002. С. 72–74.
117. Данилюк А.Л., Подрябинкин Д.А. Синхронизация колебаний связанных двухуровневых спиновых систем в резонансном поле для квантовых вычислений // Изв. Белорус. инж. акад. 2002. Т. 2, № 14/2. С.75–77.
118. Yarmolik V.N., Kolosha E.P., Bukov Y.V., et al. Design of Self-Testing VLSI. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. Vol. 1, 2. 2001.
119. Hellebrand S., Wunderlich H.-J., Ivaniuk A.A., Klimets Y.V., Yarmolik V.N. Efficient Online and Offline Testing of Embedded DRAMs // IEEE Transactions on Computers. 2002. Vol. 51, № 7. P. 801–809.
120. Yarmolik V.N., Puczek M. Power Consumption Evaluation for Built-In Self-Test Circuitry // Proceedings of the Ninth International Conference "Advanced Computer Systems" ACS'2002. 23–25 October 2002. Miedzzydroje, Poland. P. 209–215.
121. Занкович А.П., Ярмолик В.Н. Неразрушающее тестирование ОЗУ на основе анализа симметрии выходных данных // Автоматика и телемеханика. 2003. № 9. С. 141–154.
122. Борисенко В.Е. Нанoeлектроника. Ч.1. Основы нанoeлектроники. Мн.: БГУИР. 2001.
123. Борисенко В.Е., Воробьева А.И. Нанoeлектроника. Ч.2. Нанотехнология. Мн.: БГУИР. 2003.
124. Борисенко В.Е., Воробьева А.И. Нанoeлектроника. Ч.3. Транспорт носителей заряда в низкоразмерных структурах. Мн.: БГУИР. 2004 в печати.
125. Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. / V.E. Borisenko, A.B. Filonov, S.V. Gaponenko, V.S. Gurin (eds.). Minsk: Nauka i Tekhnika, 1995.
126. Physics, Chemistry and Application of Nanostructures. / V.E. Borisenko, S.V. Gaponenko, V.S. Gurin (eds.). Singapore, World Scientific. 1997, 1999, 2001, 2003.