

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 537.311.322 + 537.226 + 620.3

**НАНОРАЗМЕРНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ И ДИЭЛЕКТРИКИ: ДОСТИЖЕНИЯ
ЦЕНТРА НАНОЭЛЕКТРОНИКИ И НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ БГУИР**

В.Е. БОРИСЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, 220013 Минск, Беларусь**Поступила в редакцию 10 января 2014*

Кратко представлены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований фундаментальных электронных и оптических свойств наноструктурированного пористого кремния, квантовых пленок и шнуров из кремния и германия, наноразмерных алмазов, наноструктурированных оксидов металлов и полупроводников, наноструктур с эффектом туннельного магнитосопротивления, наноразмерных пленок HfO_2 в структурах с токовым переключением сопротивления, проведенных в Центре наноэлектроники и новых материалов БГУИР. Отмечены перспективы их применения для электронной и оптической обработки информации и в других областях.

Ключевые слова: наноструктура, наноструктурированный материал, нанотехнология.

Введение

Активный интерес к нанотехнологиям и наноматериалам появился во второй половине XX века и связан с обнаружением новых уникальных физических и химических свойств твердотельных структур с нанометровыми ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$) размерами элементов. При таких размерах наиболее ярко проявляется волновая природа электрона, и доминирующую роль приобретают квантовые процессы, что открывает новые возможности в развитии методов и обработки информации, получения электрической энергии, создания высокоэффективных медицинских препаратов и в других актуальных для человечества областях.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники одним из первых в Беларуси организовал проведение системных научных исследований и разработок наноструктур и наноструктурированных материалов из полупроводников и диэлектриков с ориентацией на их применение в электронике и смежных областях. Работы данной направленности первоначально были сосредоточены в Центре наноэлектроники и новых материалов (научный руководитель В. Е. Борисенко, директор А. А. Лешок), созданном для этих целей в 1994 г. на кафедре микроэлектроники, который и сегодня по ряду научных достижений находится в числе лидеров не только в республике, но и в мире. В данном обзоре кратко обобщены наиболее значимые полученные результаты. Они представлены в следующих группах: наноструктурированный пористый кремний, квантовые пленки и шнуры из кремния и германия, наноразмерные алмазы, наноструктурированные оксиды металлов и полупроводников, наноструктуры с эффектом туннельного магнитосопротивления, наноразмерные пленки диоксида гафния в структурах с токовым переключением сопротивления. Они также отражены в монографиях [1, 2], сборниках докладов традиционно проводимой в БГУИР Международной конференции по физике, химии и применению наноструктур (Nanomeeting) [3] и в учебниках [4, 5], подготовленных и изданных с участием сотрудников Центра наноэлектроники и новых материалов.

Наноструктурированный пористый кремний

Иницирующим фактором активных научных исследований пористого кремния как наноструктурированного материала послужило сообщение английского ученого L. T. Canham в 1990 г. об обнаружении интенсивной фотолюминесценции пористого кремния в видимом спектральном диапазоне при комнатной температуре. 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 непрямым.

При углубленном исследовании пористого кремния нами были получены научные и практические результаты с приоритетом на мировом уровне. Установлена доминирующая роль квантового ограничения в кремниевых наночастицах и механизмы его проявления при возникновении излучения в пористом кремнии [6–8], а также в анодном оксиде алюминия [9]. Разработаны, изготовлены и исследованы интегральные светодиоды на пористом кремнии [10–12], излучающие в видимой части спектра и сохраняющие работоспособность рекордное время – 10000 ч непрерывной работы. На его основе создана интегральная оптоэлектронная пара – рис. 1, включающая светодиод на пористом кремнии и кремниевый фотодиод, соединенные встроенным оптическим волноводом из Al_2O_3 , с временем отклика, не превышающим 2 нс [13–15].

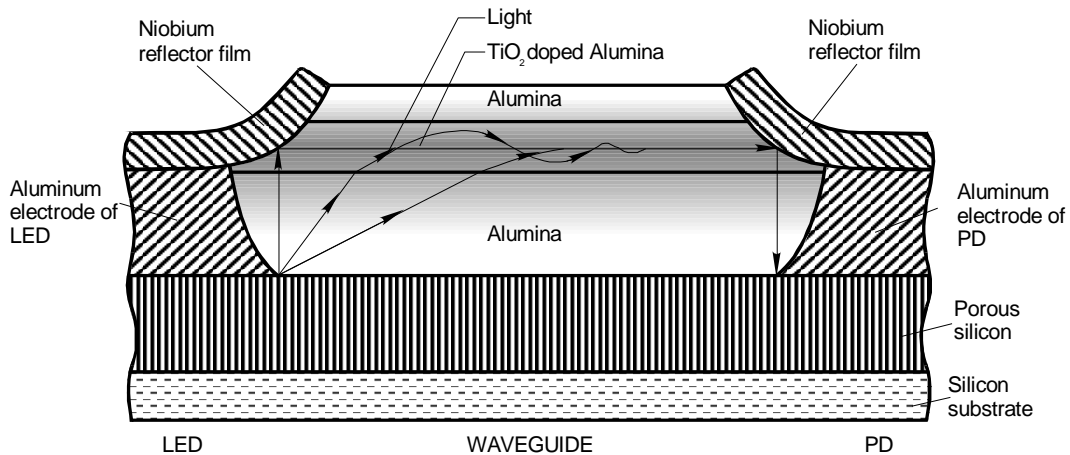


Рис. 1. Интегральная кремниевая оптоэлектронная пара

Разработана золь-гель технология легирования пористого кремния редкоземельными элементами (Er, Tb, Eu) и обнаружено усиление люминесценции ионов этих элементов за счет присутствия наночастиц кремния в пористом слое [16–19]. Установлено, что окисление пористого кремния в контакте с твердым окислителем приводит к горению или даже взрыву этого материала [20, 21], сопровождаемым образованием плазмоидов аналогичных по своему поведению шаровой молнии [22].

Квантовые пленки и шнуры из кремния и германия

Одновременно с экспериментальными работами по пористому кремнию были начаты и получили развитие теоретические исследования электронных и оптических свойств наноразмерных структур из кремния и германия, которые ведут себя как квантовые пленки, квантовые шнуры или квантовые точки. Выявлены следующие фундаментальные закономерности: 1) проявление прямозонных свойств в наноразмерных (111) пленках кремния имеет место лишь в том случае, когда он состоит из монокристаллических зерен, пассивированных водородом или кислородом [23–27], при этом ширина запрещенной зоны определяется квантовым ограничением и становится сравнимой с шириной запрещенной зоны объемного кремния при характерных размерах 2 нм и более; 2) наноразмерные (100) монокристаллические пленки из германия имеют четко выраженный прямозонный характер электронных энергетических зон [28, 29]; 3) фундаментальные электронные свойства

пассивированных водородом кремниевых нанопроволок с диаметром от 1,5 до 3 нм определяются их ориентацией вдоль кристаллографических направлений – проволоки с ориентациями $\langle 011 \rangle$ имеют ярко выраженный прямозонный характер запрещенной зоны, проволоки с ориентациями $\langle 001 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ обладают квазипрямозонным характером запрещенной зоны, а проволоки с ориентациями $\langle 112 \rangle$ характеризуются непрямым переходом [30–35].

Перспективы практического использования наноразмерных структур на основе кремния стимулировали, уже начиная со второй половины 90-х гг. прошлого века, а также работы по моделированию и экспериментальному исследованию переноса носителей заряда и электролюминесценции в таких структурах. В ходе этих работ был обнаружен и исследован эффект памяти и появление отрицательного дифференциального сопротивления в квантовых колодцах, создаваемых в многослойных наноструктурах кремний/диэлектрик [36–43], где в качестве диэлектрика выступает CaF_2 или SiO_2 . Получила всестороннее теоретическое описание электролюминесценция в них [9, 44–50]. Разработаны принципы создания и предложены конструкции светоизлучающих, переключающих и запоминающих элементов интегральных микросхем на их основе [51–53], интегральных модулей для квантовой обработки информации – рис. 2 [54–58].

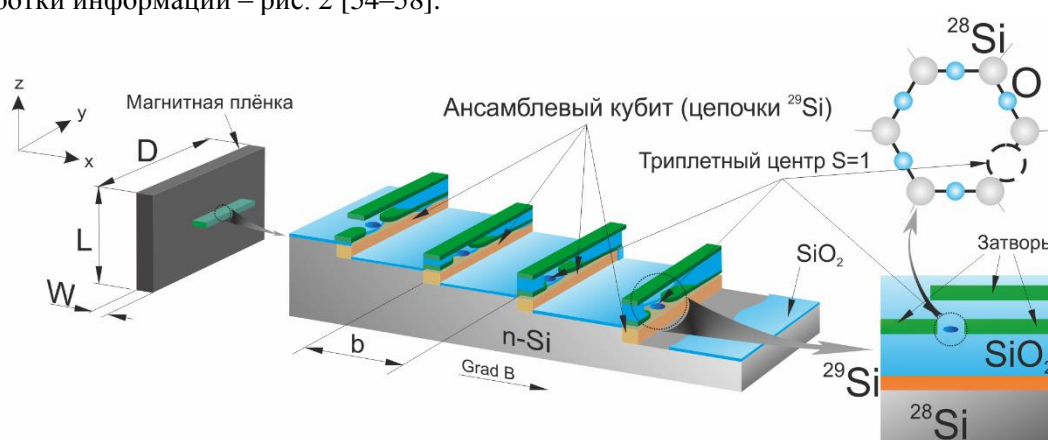


Рис. 2. Структура интегрального модуля на кремнии для квантовой обработки информации

Оригинальным развитием идей использования особенностей переноса носителей заряда в наноструктурах из полупроводников стали теоретические исследования аналогичных процессов в молекуле ДНК [59–62]. Они показали принципиальную возможность построения из этих молекул элементов для электронной обработки информации.

Наноразмерные алмазы

Понимание особенностей структуры, электронных и спиновых свойств наноразмерных алмазов имеет важное значение для их применения в качестве элементов устройств квантовой обработки информации. В проведенных нами теоретических исследованиях [63–68] установлено, что точечный дефект, образованный вакансией и примесным атомом азота – так называемый NV-центр, в наноразмерных алмазах обладает необходимыми для этих целей электронными свойствами. Сверхтонкое взаимодействие неспаренных электронов NV-центра с магнитными ядрами изотопов ^{13}C в алмазе нанометровых размеров происходит на первых и третьих соседях этих центров, что позволяет организовывать квантовую обработку информации на данных атомах.

Наноструктурированные оксиды металлов и полупроводников

Для создания наноструктур и наноструктурированных материалов из оксидов металлов и полупроводников разработаны и исследованы методы, использующие золь-гель технологию, электрохимическое анодное окисление и толсто пленочную технологию.

Установлены закономерности формирования с использованием золь-гель технологии люминесцирующих оксидов редкоземельных металлов (РЗМ) в мезоскопических порах анодного оксида алюминия [69–72], позволившие найти условия частичного или полного

заполнения пор этими материалами. Интенсивность люминесценции эрбия, тербия и европия в таких структурах на порядок и более выше, чем и в пленках ксерогеля такого же состава на плоской подложке, и в ионно-имплантированных материалах. Установлено, что фотолюминесценция в них определяется тремя основными механизмами. Это непосредственное возбуждение ионов РЗМ, возбуждение через матрицу ксерогеля и возбуждение через матрицу пористого оксида алюминия. Последний механизм усиливается благодаря многократному рассеянию возбуждающего излучения матрицей пористого анодного оксида алюминия и является основным фактором увеличения интенсивности фотолюминесценции в таких структурах. Обнаружена анизотропия интенсивности люминесценции РЗМ в пористом анодном оксиде алюминия [73], обусловленная анизотропией плотности фотонных состояний в таких структурах, которая проявляется в угловой зависимости интенсивности люминесценции с максимумом в направлении вдоль каналов пор. Показана практическая перспективность матриц из мезопористого анодного оксида алюминия для формирования в них наноструктурированных оксидов редкоземельных металлов и диоксида титана для оптических и фотокаталитических применений [73, 74].

По золь-гель технологии созданы периодические Si/SiO₂ структуры со свойствами одномерных фотонных кристаллов. На их основе разработаны интегральные оптические элементы обработки информации (направленный ответвитель, фильтр), отличающиеся повышенной селективностью и добротностью. Показано, что использование самоорганизованных монодисперсных глобул кремнезема, получаемых золь-гель методом, 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.

Разработаны методы формирования наноструктурированного диоксида титана электрохимическим анодным окислением титана [75–78]. В зависимости от состава электролита и режимов анодной обработки диоксид может иметь структуру с упорядоченными точечными и сотообразными порами, трубчатую или губкообразную структуру – рис. 3. Для формирования трубчатой структуры найдены режимы, позволяющие получать как одностенные, так и двустенные нанотрубки из диоксида титана.

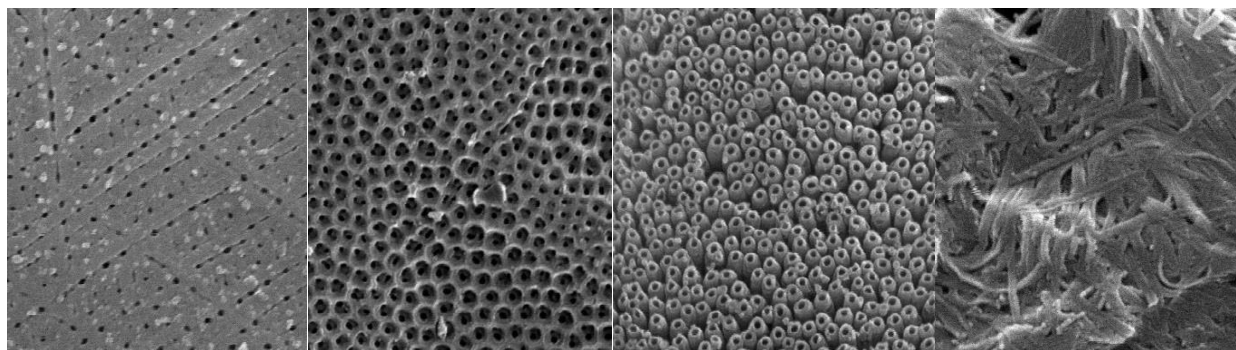


Рис. 3. Разновидности наноструктурированного диоксида титана, формируемого электрохимическим анодным окислением титана в различных режимах

Размеры структурных элементов диоксида титана, формируемого электрохимическим анодным окислением, можно варьировать от десятков до десятых долей нанометра. Получены образцы материала с площадью внутренней поверхности, достигающей 400 м²/см³, что позволяет значительно увеличить его фотокаталитическую активность по сравнению с однородным материалом того же химического состава. Высокая химическая активность полученного наноструктурированного анодного диоксида титана подтверждена в экспериментах по фотокаталитической очистке воды от органических загрязнений.

Расширение и специализация работ по золь-гель технологии и электрохимической технологии формирования наноструктур потребовали выделения из структуры Центра нанoeлектроники и новых материалов соответствующих исследовательских групп и создания на их основе новых лабораторий, каковыми стали Лаборатория нанofотоники (2004 г.,

заведующий Н. В. Гапоненко) и Лаборатория электрохимически наноструктурированных материалов (2011 г., заведующий С. К. Лазарук).

В процессе поиска и создания новых наноструктурированных материалов на основе диоксида титана предложено использовать традиционные подходы толсто пленочной технологии [79, 80]. Разработаны и исследованы оригинальные пастообразные композиции, включающих в качестве основных компонентов жидкое силикатное стекло и порошок наноструктурированного диоксида титана. Установлено, что нанесение таких композиций на стеклянные подложки и их термообработка при 200–400 °С в течение 20 мин на воздухе позволяет создавать пленки толщиной 20–40 мкм с порами размером 1–30 мкм, в которых диоксид титана проявляет свою фотокаталитическую активность. Добавление в исходную композицию поверхностно-активного вещества – гексадециламина – усиливает порообразование. Показана практическая пригодность сформированных таким образом толстых пленок для фотокаталитической очистки воды от органических загрязнений.

Экспериментальные исследования наноструктурированных оксидов металлов существенно усилены теоретическими расчетами их электронных и оптических свойств. Используя первопринципные методы расчета установлено [81], что морфология нанопроволок диоксида титана со структурой рутила определяет их стабильность и энергетический спектр. Наиболее термодинамически предпочтительные <001>-ориентированные нанопроволки имеют на своей поверхности только {110} грани, в то время как <110>-ориентированные нанопроволки характеризуются {110} и {001} гранями. Появление {100} граней на поверхности наноструктур с <001> осями приводит к значительному уменьшению ширины запрещенной зоны, хотя это не влечет за собой смещения собственного края поглощения в сторону меньших значений энергии. Обнаружены плоские зоны в районе запрещенной зоны, подобные поверхностным состояниям, которые оказались собственными свойствами <110>-ориентированных нанопроволок, не связанными с вакансиями атомов кислорода.

Расчеты электронных и оптических свойств выполнены и для объемных оксидов вольфрама [82–84]. Полученные результаты показали, что эти свойства могут меняться от металлических до полупроводниковых в зависимости от стехиометрического состава и кристаллической структуры. Такие вариации возможны в наноструктурированных оксидах вольфрама, получаемых различными методами, что необходимо учитывать при оптимизации соответствующей технологии.

Наноструктуры с эффектом туннельного магнитосопротивления

Поиск путей использования спина электрона в устройствах обработки информации в конце XX века привел к выделению из наноэлектроники нового направления в науке и технике, которое получило название «спинтроника» [1]. В этом направлении важное место заняло использование эффекта туннельного магнитосопротивления. В рамках детального теоретического анализа особенностей этого эффекта в наноструктурах ферромагнетик/диэлектрик/ферромагнетик, ферромагнетик/диэлектрик/полупроводник нами разработаны модели, учитывающие потенциальный рельеф, приложенное напряжение, зарядовые силы изображения, рассеяние подвижных носителей заряда на потенциальном рельефе [85–89]. Установлено, что в зависимости от особенностей потенциального рельефа в таких структурах могут иметь место осцилляции туннельного магнитосопротивления, связанные с немонотонной зависимостью коэффициентов прохождения электронов через соответствующие потенциальные барьеры и с расщеплением разрешенных энергетических состояний электронов в молекулярном поле ферромагнетика. Установлены условия, при которых значение туннельного магнитосопротивления практически не зависит от рассеяния на границах структуры.

Предложена конструкция спиновой ячейки памяти на основе двух CoFe/MgO/Si магнитных туннельных гетеропереходов с наноразмерными ферромагнитными областями шириной от 70 нм до 1 мкм, интегрированная в кремниевую подложку [90,91]. Для нее разработана электрическая эквивалентная схема, включающая пассивные и активные элементы электрической цепи, отражающие реально существующие области в кремниевой пластине и протекающие в них физические процессы. Предложена динамическая модель такой ячейки

магниторезистивной памяти, позволяющая проводить анализ и проектирование спинтронных устройств, совместимых по изготовлению со стандартным КМОП технологическим процессом.

Найдены новые магнитные полупроводники – это легированные марганцем полупроводниковые соединения $ZnGeP_2$, $BeSiAs_2$, $BeGeAs_2$ – обладающие перспективными для спинтроники электронными свойствами [92, 93].

Наноразмерные пленки HfO_2 в структурах с токовым переключением сопротивления

Изменение на несколько порядков величины электрического сопротивления структуры металл/диэлектрик/полупроводник с диэлектриком нанометровой толщины в зависимости от приложенного к ней напряжения и, соответственно, протекающего тока представляется чрезвычайно перспективным явлением для создания нового поколения интегральных ячеек памяти со сверхвысокой степенью интеграции. Однако к началу работ в этом направлении механизмы этого явления оставались до конца непонятыми. Выполненные автором теоретические исследования в сочетании с экспериментами, проведенными партнерами из Наньянского технологического университета (Сингапур) на примере использования в качестве диэлектрика диоксида гафния толщиной 10 нм, [94–97] позволили установить, что при первом повышении приложенного к структуре напряжения до пробивного в диэлектрике формируются тонкие (толщиной порядка 1 нм) каналы, имеющие пониженное электрическое сопротивление за счет образования в них вакансий кислорода и обогащения этих областей атомами металла из соседнего электрода. При последующем периодическом изменении приложенного напряжения с меньшей амплитудой эти каналы изменяют свое электрическое сопротивление в зависимости от величины и полярности приложенного напряжения, что дает вольт-амперные характеристики с характерным гистерезисом. Наблюдающееся переключение сопротивления токопроводящих каналов в наноразмерном диэлектрике получило свое объяснение в рамках предложенных нами моделей, учитывающих тепловые эффекты и ловушки подвижных носителей заряда, связанные с кислородными вакансиями и примесными атомами металлов. Достигнутое понимание исследованных процессов позволило выработать практические рекомендации по созданию высокоинтегрированных ячеек памяти на эффекте переключения сопротивления, которые в настоящее время проходят экспериментальную проверку.

Заключение

Первое двадцатилетие деятельности Центра наноэлектроники и новых материалов Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники отмечено значительными достижениями в познании закономерностей явлений, происходящих в наноразмерных твердотельных структурах, в развитии технологии их изготовления и в использовании наноструктур для электронной и оптической обработки информации, для получения тепловой энергии (быстрое окисление пористого кремния), для фотокаталитической очистки воды от органических загрязнений. Признание полученных результатов научным сообществом характеризуется высоким уровнем цитирования опубликованных работ. Так *h*-индекс ведущих специалистов (В. Е. Борисенко, Н. В. Гапоненко, С. К. Лазарук, Д. Б. Мигас) составляет 12–18 [98] и продолжает расти. Защищено 16 кандидатских (Е. А. Бачило, А. Н. Холод, Д. Б. Мигас, В. Л. Шапошников, А. А. Лешок, А. И. Нарейко, Ю. А. Берашевич, П. П. Жагино, О. В. Сергеев, И. С. Молчан, В. В. Шушунова, А. В. Кривошеева, А. А. Стекольников, Т. В. Ким, В. А. Пушкарчук, Д. А. Подрябинкин) и 4 докторских (Н. В. Гапоненко, А. Н. Холод, С. К. Лазарук, Д. Б. Мигас) диссертации.

Выражаю благодарность профессорам Н. В. Гапоненко, С. К. Лазаруку, Д. Б. Мигасу и доценту А. Л. Данилюку за обсуждение данного обзора и критические замечания, способствовавшие его совершенствованию.

NANODIMENSIONAL SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS: ACHIEVEMENTS OF NANOELECTRONICS AND NOVEL MATERIALS CENTER OF BSUIR

V.E. BORISENKO

Abstract

It is a short review of the most valuable theoretical and experimental results obtained in the center of nanoelectronics and novel materials. Electronic and optical properties of nanostructured porous silicon, quantum films and wires of silicon and germanium, nanodiamonds, nanostructured oxides of metals and semiconductors, nanostructures with the effect of tunneling magnetoresistance, nanodimensional HfO_2 films in the structures with resistive switching are summarized. Their application is presented.

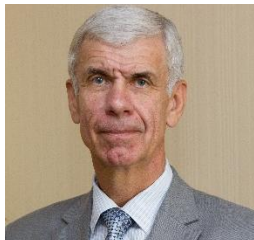
Список литературы

1. *Borisenko V.E., Ossicini S.* What is What in the Nanoworld. Weinheim, 2004; Second Edition, 2008; Third Edition, 2012.
2. *Анищук В.М., Борисенко В.Е., Жданок С.А. и др.* Наноматериалы и нанотехнологии. Минск, 2008.
3. *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures / Eds. Borisenko V.E., Gaponenko S.V., Gurin V.S., Kam C.H.* Singapore, 1997, 1999, 2001, 2003, 2005, 2009, 2011, 2013.
4. *Борисенко В.Е., Воробьева А.И., Уткина Е.А.* Нанозлектроника. М., 2009.
5. *Борисенко В.Е., Воробьева А.И., Данилюк А.Л., Уткина Е.А.* Нанозлектроника: теория и практика. М., 2013.
6. *Bondarenko V. P., Borisenko V.E. et al.* // J. Appl. Phys. 1994. Vol. 75. № 5. P. 2727–2729.
7. *Лешок А.А., Германенко И.Н., Борисенко В.Е. и др.* // ЖПС. 1994. Т. 61. № 3–4. С. 237–240.
8. *Берашевич Ю.А., Лазарук С.К., Борисенко В.Е.* // ФТП. 2006. Т. 40. № 2. С. 240–245.
9. *Лазарук С.К., Сасинович Д.А., Борисенко В.Е. и др.* // ФТП. 2007. Т. 41. № 9. С. 1126–1129.
10. *Lazarouk S.K., Jaguiro P.V., Borisenko V.E.* // Microsystems and Nanotechnology / Eds. Nassiopoulou A.G., Zianni X. Singapore. 2001. P. 41–44.
11. *Лазарук С.К., Жагиро П.В., Борисенко В.Е. и др.* // Изв. Акад. Наук. Физич. сер. 2002. Т. 66. № 2. С. 178–182.
12. *Лазарук С.К., Лешок А.А., Борисенко В.Е. и др.* // ФТП. 2005. Т. 39. № 1. С. 149–152.
13. *Lazarouk S., Jaguiro P., Borisenko V.* // Phys. Stat. Sol. (a). 1998. Vol. 165. № 1. P. 87–90.
14. *Lazarouk S.K., Leshok A.A., Borisenko V.E. et al.* // Microel. Eng. 2000. Vol. 50. № 1–4. P. 81–86.
15. *Lazarouk S.K., Jaguiro P.V., Borisenko V.E. et al.* // Physica E. 2003. Vol. 16. P. 495–498.
16. *Dorofeev A.M., Gaponenko N.V., Borisenko V.E. et al.* // J. Appl. Phys. 1995. Vol. 77. № 6. P. 2679–2683.
17. *Dorofeev A., Bachilo E., Borisenko V.E. et al.* // Thin Solid Films. 1996. Vol. 276. № 1. P. 171–174.
18. *Gaponenko N.V., Mudryi A.V., Borisenko V.E. et al.* // Phys. Stat. Sol. (a). 1997. Vol. 165. № 1. P. 131–134.
19. *Bondarenko V., Vorozov N., Borisenko V.E. et al.* // Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 1999. Vol. 536. P. 69–74.
20. *Лазарук С.К., Долбик А.В., Борисенко В.Е. и др.* // ФТП. 2005. Т. 39. № 8. С. 917–919.
21. *Лазарук С.К., Долбик А.В., Борисенко В.Е. и др.* // ФТП. 2007. Т. 41. № 9. С. 1130–1134.
22. *Лазарук С.К., Долбик А.В., Борисенко В.Е. и др.* // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 84. № 11. С. 695–699.
23. *Filonov A.B., Kholod A.N., Borisenko V.E. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 70. № 6. P. 744–746.
24. *Холод А.Н., Филонов А.Б., Борисенко В.Е.* // Докл. Акад. наук Беларуси. 1997. Т. 41. № 4. С. 58–61.
25. *Filonov A.B., Kholod A.N., Borisenko V.E.* // Phys. Stat. Sol. (a). 1998. Vol. 165. № 1. P. 57–61.
26. *Filonov A.B., Kholod A.N., Borisenko V.E. et al.* // Phys. Rev. B. 1998. Vol. 57. № 3. P. 1394–1397.
27. *Filonov A.B., Kholod A.N., Borisenko V.E. et al.* // Comp. Mat. Sci. 1998. Vol. 10. №1–4. P. 148–153.
28. *Kholod A.N., Saül A., Borisenko V.E. et al.* // Phys. Rev. 2000. Vol. 62. № 19. P. 12949–12954.
29. *Kholod A.N., Borisenko V.E., Saül A. et al.* // Optical Materials. 2001. Vol. 17. № 1. P. 61–63.
30. *Filonov A.B., Petrov G.V., Borisenko V.E. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 67. № 8. P. 1090–1091.
31. *Kholod A.N., Shaposhnikov V. L., Borisenko V.E. et al.* // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 70. № 3. P. 035317.
32. *Migas D.B., Borisenko V.E.* // Nanotechnology. 2007. Vol. 18. № 37. P. 375703.
33. *Migas D.B., Borisenko V.E.* // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 76. № 3. P. 035440.
34. *Migas D.B., Borisenko V.E.* // J. Appl. Phys. 2008. Vol. 104. № 2. P. 024314.
35. *Migas D.B., Borisenko V.E.* // J. Appl. Phys. 2009. Vol. 105. № 10. P. 104316.
36. *Kholod A.N., Borisenko V.E., Zaslavsky A. et al.* // Phys. Rev. B. 1999. Vol. 60. № 23. P. 15975–15979.

37. *Ménard S., Liniger M., Borisenko V.E. et al.* // *Mat. Sci. Eng. B.* 2000. Vol. 69–70. P. 464–467.
38. *Берашевич Ю.А., Данилюк А.Л., Борисенко В.Е.* // *Изв. Бел. инж. акад.* 2000. Т. 1. № 9/2. С. 51–53.
39. *Ménard S. Kholod A.N., Borisenko V.E. et al.* // *Phys. Stat. Sol. (a).* 2000. Vol. 181, № 2. P. 561–568.
40. *Berashevich Yu.A., Danilyuk A.L., Borisenko V.E. et al.* // *Semiconductors.* 2001. Vol. 35. № 1. P. 112–116.
41. *Liniger M., Kholod A.N., Borisenko V.E. et al.* // *J. Appl. Phys.* 2001. Vol. 89. № 11. P. 6281–6284.
42. *Берашевич Ю.А., Данилюк А.Л., Борисенко В.Е. и др.* // *ФТП.* 2002. Т. 36. № 1. С. 91–96.
43. *Berashevich J.A., Borisenko V.E., Lazzari J.-L. et al.* // *Phys. Rev. B.* 2007. Vol. 75. № 11. P. 115336.
44. *Borisenko V.E., Danilyuk A.L., Borisenko V.E.* // *Russian Microelectronics.* 1998. Vol. 27. № 4. P. 233–239.
45. *Kholod A.N., Danilyuk A.L., Borisenko V.E. et al.* // *J. Appl. Phys.* 1999. Vol. 85. № 10. P. 7219–7223.
46. *Данилюк А.Л., Борисенко В.Е.* // *ЖПС.* 2005. Т. 72. № 3. С. 397–403.
47. *Данилюк А.Л., Борисенко В.Е.* // *ЖПС.* 2005. Т. 72. № 4. С. 524–529.
48. *Данилюк А.Л., Борисенко В.Е.* // *ЖПС.* 2005. Т. 72. № 5. С. 644–649.
49. *Korolev A.V., Danilyuk A.L., Borisenko V.E.* // *Elektronika.* 2006. Vol. 47. № 5. P. 42–45.
50. *Берашевич Ю.А., Каменев Б.В., Борисенко В.Е.* // *ФТП.* 2002. Т. 36. № 2. С. 221–226.
51. *Берашевич Ю.А., Королев А.В., Борисенко В.Е. и др.* // *ЖТФ.* 2003. Т. 73. № 1. С. 67–72.
52. *Berashevich J.A., Danilyuk A.L., Borisenko V.E. et al.* // *Mat. Sci. Eng.* 2003. Vol. B101. № 1. P. 111–118.
53. *Berashevich J.A., Danilyuk A. L., Borisenko V.E.* // *Mat. Sci. Eng.* 2003. Vol. B101., № 1. P. 300–304
54. *Королев А.В., Андреев А.В., Борисенко В.Е. и др.* // *Докл. БГУИР.* 2006. № 5. С. 57.
55. *Подрябинкин Д.А., Данилюк А.Л., Борисенко В.Е.* // *Докл. БГУИР.* 2006. № 5. С. 76.
56. *Подрябинкин Д.А., Данилюк А.Л., Борисенко В.Е.* // *Прикл. физика.* 2008. № 4. С.20–26.
57. *Подрябинкин Д.А., Данилюк А.Л., Борисенко В.Е.* // *Докл. БГУИР.* 2009. № 3. С. 67–72.
58. *Подрябинкин Д.А., Данилюк А.Л., Борисенко В.Е.* // *Прикл. физика.* 2011. № 2. С.12–18.
59. *Новик Н.В., Берашевич Ю.А., Борисенко В.Е.* // *Докл. БГУИР.* 2003. № 2. С. 20–28.
60. *Берашевич Ю.А., Новик Н.В., Борисенко В.Е.* // *Микроэлектроника.* 2004. Т. 33. № 3. С. 209–217.
61. *Гриб Н.В., Берашевич Ю.А., Борисенко В.Е.* // *Биофизика.* 2007. Т. 52. № 6. С. 1008–1016.
62. *Гриб Н.В., Берашевич Ю.А., Борисенко В.Е.* // *Биофизика.* 2007. Т. 53. № 1. С. 30–35.
63. *Пушкарчук В.А., Килин С.Я., Борисенко В.Е. и др.* // *Опт. спектр.* 2005. Т. 99. № 2. С. 261–272.
64. *Пушкарчук В.А., Килин С.Я., Борисенко В.Е. и др.* // *Докл. БГУИР.* 2006. № 5. С. 71.
65. *Пушкарчук В.А., Килин С.Я., Борисенко В.Е. и др.* // *ЖПС.* 2007. Т. 74. № 1. С. 86–92.
66. *Пушкарчук В.А., Килин С.Я., Борисенко В.Е. и др.* // *Докл. БГУИР.* 2009. № 2. С. 17–22.
67. *Pushkarchuk V., Nizovtsev A., Borisenko V.E. et al.* // *Proceedings SPIE.* 2009. Vol. 7377. P. 737707.
68. *Пушкарчук В.А., Пушкарчук А.Л., Борисенко В.Е. и др.* // *Опт. спектр.* 2010. Т. 108. № 2. С. 278–284.
69. *Garonenko N.V., Parkin V.M., Borisenko V.E. et al.* // *Thin Solid Films.* 1997. Vol. 297. № 1. P. 202–206.
70. *Гапоненко Н.В., Мудрый А.В., Борисенко В.Е. и др.* // *Неорг. матер.* 1997. Т. 33, № 9. С. 1082–1086.
71. *Lazarouk S.K., Miry A.V., Borisenko V.E.* // *Appl. Phys. Lett.* 1998. Vol. 73. № 16. P. 2272–2274.
72. *Сергеев О.В., Гапоненко Н.В., Борисенко В.Е. и др.* // *Изв. Бел. инж. акад.* 2000. Т. 1. № 9/2. С. 5–8.
73. *Garonenko N.V., Kortov V.S., Borisenko V.E. et al.* // *Microel. Eng.* 2012. Vol. 90. № 1. P. 131–137.
74. *Linnik O., Smirnova N., Borisenko V.E. et al.* // *Adv. Sci. Eng. Medicine.* 2013. Vol. 5. № 4. P. 281–286.
75. *Lazarouk S.K., Sasinovich D.A., Borisenko V.E.* // *Phys. Stat. Sol. (c).* 2008. Vol. 5. № 12. 3690–3693.
76. *Купреева О.В., Сасинович Д.А., Борисенко В.Е. и др.* // *Докл. БГУИР.* 2011. № 3. С. 29–33.
77. *Купреева О.В., Лазарук С.К., Борисенко В.Е. и др.* // *ЖПС.* 2012. Т. 79. № 6. С. 1010–1013.
78. *Lazarouk S. K. Sasinovich D. A. Borisenko V.E. et al.* // *Thin Solid Films.* 2012. Vol. 526. № 1. P. 41–44.
79. *Ашуркевич К.В., Николаенко И.А., Борисенко В.Е.* // *Докл. БГУИР.* 2012. № 6. С. 51–57.
80. *Ашуркевич К.В., Николаенко И.А., Борисенко В.Е.* // *Докл. БГУИР.* 2013. № 2. С. 10–13.
81. *Migas D.B., Shaposhnikov V.L., Borisenko V.E. et al.* // *J. Phys. Chem. C.* 2010. Vol. 114. № 49. P. 21013–21019.
82. *Migas D.B., Shaposhnikov V.L., Borisenko V.E. et al.* // *J. Appl. Phys.* 2010. Vol. 108. № 9. P. 093713.
83. *Migas D.B., Shaposhnikov V.L., Borisenko V.E.* // *J. Appl. Phys.* 2010. Vol. 108. № 9. P. 093714.
84. *Shaposhnikov V.L., Migas D.B., Borisenko V.E. et al.* // *Phys. Stat. Sol. (b).* 2011. Vol. 248. № 6. P. 1471–1476.
85. *Изнатенко С.А., Данилюк А.Л., Борисенко В.Е.* // *ЖТФ.* 2005. Т. 75. В. Е. № 6. P. 8–12.
86. *Изнатенко С.А., Борисенко В.Е.* // *ФТП.* 2005. Т. 39. № 9. С. 1083–1088.
87. *Панфиленок А.С., Данилюк А.Л., Борисенко В.Е.* // *ЖТФ.* 2008. Т. 78. № 4. С. 89–94.
88. *Sidorova T.N., Danilyuk A.L., Borisenko V.E. et al.* // *Proceedings SPIE.* 2009. Vol. 7377. P. 737708.
89. *Кухарев А.В., Данилюк А.Л., Борисенко В.Е.* // *ЖТФ.* 2010. Т. 80. № 9. С. 80–84.
90. *Костров А.И., Стемпицкий В.Р., Борисенко В.Е. и др.* // *Докл. БГУИР.* 2010. № 2. С. 23–29.
91. *Костров А.И., Данилюк А.Л., Борисенко В.Е. и др.* // *Микроэлектроника.* 2011. Т. 40. № 5. С. 393–400.
92. *Krivosheeva A.V., Shaposhnikov V.L., Borisenko V.E. et al.* // *Microel. Reliability.* 2006. Vol. 46. P. 1747–1749.
93. *Krivosheeva A.V., Shaposhnikov V.L., Borisenko V.E. et al.* // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2009. Vol. 21. № 4. P. 045507.
94. *Wu X., Migas D.B., Borisenko V.E. et al.* // *Appl. Phys. Lett.* 2010. Vol. 96. № 7. P. 172901.
95. *Danilyuk M.A., Migas D.B., Borisenko V.E. et al.* // *J. Nano- Electronic Phys.* 2012. Vol. 4. P. 01014.

96. *Danilyuk M.A., Migas D.B., Borisenko V.E. et al. // Phys. Stat. Sol. (a). 2013. Vol. 210. № 2. P. 361–366.*
97. *Wu X., Cha D., Borisenko V.E. et al. // J. Appl. Phys. 2013. Vol. 113. № 11. P. 114503.*
98. Scopus. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.scopus.com. – Дата доступа: 21.12.2014.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



Борисенко Виктор Евгеньевич (1951 г.р.), д.ф.-м.н., профессор. В 1973 г. окончил МРТИ. В 1980 г. защитил кандидатскую, в 1988 г. – докторскую диссертацию. С 1990 г. активно занимается проблемами нанoeлектроники и нанотехнологий. Заведующий кафедрой микро- и нанoeлектроники БГУИР, научный руководитель Центра нанoeлектроники и новых материалов. Автор 8 книг и более чем 380 научных статей, редактор 9 сборников докладов Международных конференций по физике, химии и применению наноструктур «Nanomeeting». Подготовил 24 кандидата и 5 докторов наук.