

- Regional Centre of Forensic Science of the Ministry of Justice of the Russian Federation, 2011, pp. 199-206.
9. Dvorkovich A.V., Dvorkovich V.P. *Tsifrovye videoinformatsionnye sistemy (teoriya i praktika)* [Digital video information system (theory and practice)], Moscow, Tekhnosfera, 2012, 1007 p.
10. Revyakin, M. Yu. *Metody, resheniya osnovnykh voprosov kriminalisticheskoy ekspertizy videozapisej, Teoreticheskie i prakticheskie voprosy kriminalisticheskoy ekspertizy videozapisej na sovremennom etape eyo razvitiya: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, Nizhny Novgorod, The Privolzhsky Regional Centre of Forensic Science of the Ministry of Justice of the Russian Federation, 2013. pp. 28-35.
11. Gonsales R., Vuds R., Ehddins S. *Cifrovaya obrabotka izobrazhenij v srede MATLAB* [Digital image processing in MATLAB], russ. ed.: V.V. СНепыzhova, Moscow, Tekhnosfera, 2006, 616 p.

Received 25.05.2017

УПРАВЛЕНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ОТРАСЛИ ИНФОКОММУНИКАЦИЙ

УДК 621.38

НОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА ДЛЯ УСТРОЙСТВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ТЕЛЕВЕЩАНИЯ

Галочкин В.А.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ

E-mail: galochkin.vladimir@yandex.ru

Обзор посвящен актуальным вопросам изучения основ электроники и схемотехники в области телекоммуникаций и телевидения. Дана краткая характеристика содержания существующих учебных курсов для телекоммуникационных вузов и проведен анализ изменений в области электроники и схемотехники. Представлен пример использования новых элементов (мемристоров) при создании нейронных сетей нового типа, новых принципов построения ячеек памяти с более высоким быстродействием. Предлагается включить в учебные программы данные о новых материалах и новой элементной базе современной электроники и схемотехники.

Ключевые слова: нанотехнологии, нанoeлектроника, схемотехника, транзисторы, телекоммуникации

Введение

Требования ФГОС-3+ [1-2] высшего образования по дисциплинам по электронике и схемотехнике определяют, что «...в результате обучения базовой части цикла обучающийся должен обладать

– готовностью учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности; должен знать:

– основные физические явления; фундаментальные понятия, законы и теории современной физики твердотельных элементов микро- и нанoeлектроники;

– особенности проявления квантовых эффектов в базовых элементах нанoeлектроники, их классификацию».

Как уже отмечалось [3], современные телекоммуникационные технологии и, соответственно, уровень базовых знаний, лежащий в их основе,

за последние двадцать лет кардинально изменились. Цель данной статьи – краткий обзор изменений в современном содержании электроники и изменения ее элементной базы и перспектив их развития в области телекоммуникаций и телевидения; обоснование необходимости дополнить содержание существующих дисциплин по электронике и схемотехнике для телекоммуникационных вузов основными знаниями о новых материалах и новой элементной базе.

Существующее содержание дисциплин по электронике и схемотехнике

Существующие учебники и учебные пособия по электронике и схемотехнике (приборы, устройства и их схемотехника) при всем их разнообразии базируются на следующих основных научных направлениях [4-7].

1. Вакуумная электроника.

1.1. Приборы и устройства вакуумной электроники (СВЧ-приборы и устройства; электрон-

но-лучевые устройства и приборы; фотоэлектронные устройства и др.).

2. Плазменная электроника.

2.1. Приборы и устройства плазменной электроники (ионные приборы, ионные приборы обработки и отображения информации и др.).

3. Микроэлектроника.

3.1. Приборы и устройства микроэлектроники (полупроводниковые структуры; интегральные транзисторные структуры; аналоговая и цифровая схемотехника, запоминающие устройства, микропроцессоры и компьютеры на базе биполярных и полевых транзисторов; интегральные микросхемы и устройства СВЧ-диапазона и др.).

4. Квантовая и оптическая электроника.

4.1. Приборы и устройства квантовой и оптической электроники (лазеры, плоские волноводы, волоконные волноводы, фотодиоды, фотоприемники, оптоэлектронные устройства и др.).

Анализ вышеуказанной литературы показывает, что базой существующих учебников и учебных пособий по электронике и схемотехнике являются результаты фундаментальных исследований и открытий по выше названным научным и инженерным направлениям, полученным вплоть до середины XX века.

Основные изменения в микроэлектронике и перспективы развития

В [8-11] показано, что последняя треть XX века характеризуется глобальными научными достижениями в области микроэлектроники, которые привели к кардинальным изменениям ее технологических принципов и применению новых материалов для создания современной элементной базы. С начала 60-ых годов, когда появились первые интегральные микросхемы, непрерывно велись работы по их миниатюризации, и сегодня размеры транзистора уменьшились до десятых долей микрона. Однако дальнейшее развитие требует принципиально новых решений.

Диапазон 1,0 ... 0,1 мкм представляет собой сложный технологический барьер. Диапазон линейных размеров 0,1 ... 0,05 мкм – это фундаментальный физический барьер, за которым все свойства твердого тела, включая электропроводность, резко меняются и наглядные образы, а также и привычные теоретические модели теряют силу. Начинают проявляться в полной мере квантовые эффекты, а физика проводимости определяется квантово-механической интерференцией электронных волн.

Вместе с тем характеристические размеры полупроводниковых структур 100 ... 10 нм (наноме-

тровый диапазон) являются определяющими для современной микроэлектроники. Именно с ними связывают дальнейшие перспективы развития. Наряду с «традиционным» путем перехода к наноструктурам появился и другой путь решения проблем – использование квантовой природы электрона, что привело к интенсивному исследованию интерференции и резонансного туннелирования носителей заряда в полупроводниковых структурах. Изучение квантовых эффектов в сверхтонких полупроводниковых гетероструктурах дало толчок к появлению новых классов полупроводниковых приборов.

Резонансные туннельные диоды (РТД) и транзисторы (РТТ), обладают высоким быстродействием (предельные частоты 1012 Гц) и широким спектром возможностей. Особенно интересны униполярные и биполярные РТТ и квантовые интерференционные транзисторы, имеющие вольт-амперные характеристики (ВАХ) с участками положительной и отрицательной крутизны. Параметры ВАХ можно регулировать как подбором полупроводниковой структуры, так и изменением электрических режимов работы, что позволяет по-новому подойти к построению аналоговых и цифровых устройств.

В настоящее время обсуждаются проблемы создания квантовых интегральных схем и даже квантового компьютера, основными элементами которых станут квантовые точки, квантовые проводники, квантовые ямы, транзисторные структуры на основе квантовых размерных эффектов и устройств с управляемой интерференцией электронов.

Перечисленные фундаментальные исследования и разработки показывают, насколько физические принципы и явления, лежащие в основе современной наноэлектроники, отличаются от ранее используемых в электронике и микроэлектронике структур [9].

Изменения в элементной базе микроэлектроники. В существующих учебных программах элементная база электроники и ее технология основана на традиционных материалах – германии и кремнии. В подтверждение заявленного в начале статьи тезиса о необходимости введения в курсы по электронике и схемотехнике новых (хотя бы минимальных) базовых знаний рассмотрим изменения в использовании новых материалов и технологий для уже разработанных сегодня устройств (и которые не изучаются при преподавании телекоммуникационных дисциплин). Предполагается при этом, что читателю (студенту) известны такие понятия, как размерное квантование, квантовая

яма, потенциальные барьеры, и другие базовые понятия и термины квантовой физики).

Проблемы при создании транзисторов. Для существующих транзисторов на кремниевой основе практически наступил технологический предел. В процессе уменьшения длин канала и затвора достигнуто значение порядка 30 нм и меньше; толщина подзатворного окисла в схемах микропроцессоров сейчас составляет 0,8 нм, или три атомных слоя. Это позволило увеличить быстродействие микропроцессоров, снизить потребление энергии, вместе с тем возросли токи утечки (в том числе за счет туннельного тока через слой оксида), причем они весьма значительны даже для отключенного транзистора. С уменьшением толщины областей истока-стока возрастает их сопротивление, а значит, нужно большее напряжение для переключения транзистора, при этом увеличивается и потребляемая мощность. С увеличением напряжения возрастает опасность пробоя слоя диэлектрика из трех атомных слоев. Дальнейшее уменьшение длины канала требует увеличения степени легирования в канале до 10^{18} см⁻³. Это приведет к снижению подвижности носителей и росту порога включения транзистора [10].

Решение проблем при создании современных устройств электроники - новые технологии и новые материалы

Новые транзисторы и диоды. В учебниках и учебных пособиях 2010-2013 годов издания [8-10] приводится перечень транзисторов, разработанных по современным технологическим принципам с применением новых материалов:

- кремниевые МДП транзисторы (High-K технология metal gate, КНИ МДП транзисторы, транзисторы с двойным затвором);

- полевые транзисторы с затвором Шоттки;

- гетеротранзисторы (HEMT-транзисторы, MODFET-транзисторы, резонансно-туннельные транзисторы, гетероструктурный транзистор на квантовых точках);

- транзисторы на основе одноэлектронного туннелирования (кремниевый одноэлектронный транзистор с двумя затворами, квантово-точечный КНИ транзистор, одноэлектронные транзисторы на основе гетероструктур, транзисторы на основе туннельных переходов МДМ, приборы на основе цепочек коллоидных частиц золота, молекулярный одноэлектронный транзистор, одноэлектронный механический транзистор);

- баллистические транзисторы (интерференционные транзисторы, полевые транзисторы на отраженных электронах);

- нанотранзисторы на основе углеродных нанотрубок;

- транзисторы на горячих электронах;

- квантовые и фотонные транзисторы;

- спин-вентильный транзистор;

- спиновый диод;

- диэлектрические диоды и др.

Кратко рассмотрим принципы построения и работы ряда данных устройств.

High-K технология metal gate. В новых технологиях для транзисторов 45 нм разрешения и ниже (32; 28 нм) предложено взамен SiO₂ использовать в качестве подзатворного диэлектрика диэлектрик по High-K технологии. К таким диэлектрикам сегодня можно отнести двуокись гафния и двуокись циркония (HfO₂, ZrO₂). Более высокая диэлектрическая проницаемость этих диэлектриков позволяет обеспечивать приемлемую крутизну МОП транзисторов при более толстых подзатворных диэлектриках. При этом снижаются паразитные туннельные токи и токи утечки между затвором и другими областями транзистора [10].

Резонансно-туннельные транзисторы. Когда электроны заключены в области пространства, размеры которого сравнимы с длиной волны электрона и ограничены потенциальными барьерами, появляются два взаимосвязанных эффекта. Первый из них – размерное квантование. Другой эффект – резонанс, который наступает при определенных условиях размерного квантования; в этом случае электронные волны отражаются от стенок квантовой потенциальной ямы. Если энергетические уровни электронов по обе стороны барьеров совпадают по энергии, то речь идет о резонансе электронных волн. В этом случае наблюдается резкое возрастание туннельного тока. На основе эффекта резонансного туннелирования созданы туннельно-резонансные структуры (ТРС), которые применяются в полупроводниковой электронике и оптоэлектронике. Основными приборами на туннельно-резонансных структурах, в которых можно создать одну или несколько квантовых ям, стали диоды и их различные комбинации. Созданы туннельно-резонансные транзисторы, в том числе с квантовыми ямами [10].

Гетероструктурный транзистор на квантовых точках. Транзисторы на квантовых точках представляют, по существу, новый тип приборов на горячих электронах, весьма перспективный для СВЧ-электроники. Квантовые точки возникают в слое, если его толщина превышает некоторое критическое значение. Транспорт электронов в гетероструктурах с квантовыми точками имеет

две компоненты. Одна компонента формируется подвижными электронами из двумерного газа и соответствует насыщению их дрейфовой скорости, другая обусловлена электронами, локализованными в квантовых ямах. Вторая компонента дает вклад в электронный транспорт только в сильных электрических полях. Такой тип транзисторов принципиально отличается от всех известных полевых транзисторов. Они имеют высокую крутизну, малую емкость, что позволяет разработчикам электронной аппаратуры надеяться на их использование в СВЧ-приборах [10].

Транзисторы на основе одноэлектронного туннелирования. Одноэлектронные устройства представляют собой перспективные нанoeлектронные приборы, основанные на эффекте дискретного туннелирования отдельных электронов и обеспечивающие ультранизкие уровни потребляемой энергии при ультранизких уровнях напряжения. В отличие от обычного движения электронов в проводнике, которое зависит лишь от их коллективных свойств, при туннелировании проявляются индивидуальные характеристики каждой частицы. Электроны проходят через слой диэлектрика по отдельности, и это позволяет зарегистрировать перемещение с проводника на проводник даже одного из них. Кремниевые одноэлектронные приборы появились в результате конструктивного и технологического прорыва при создании МОП-транзисторных структур [10].

Нанотранзисторы на основе углеродных нанотрубок. Транзисторы на нанотрубках выгодно отличаются от всех вышерассмотренных типов меньшими размерами и меньшим энергопотреблением. Реальные нанотранзисторы на углеродных нанотрубках были получены и исследованы в Московском институте электронной техники (МИЭТ). На одном квадратном сантиметре поверхности кристалла было размещено около миллиарда углеродных нанотрубок, которые являются активными элементами транзисторов нового типа [10].

Новые технологии – память NRAM

Американская компания Nantero (www.nantero.com) активно занимается созданием новой технологии создания энергонезависимой оперативной памяти NRAM (Nanotube-based Random Access Memory) на основе углеродных нанотрубок. Такая память будет обладать высокой стойкостью к воздействию температуры и магнитных полей. Само запоминающее устройство состоит из двух кремниевых подложек, на которых особым образом размещены массивы нанотрубок. Технология

массачусетской компании использует два таких свойства, как эластичность (гибкость) нанотрубок и притягивание атомов углерода друг к другу под воздействием сил Ван-дер-Ваальса. Утверждается, что малое расстояние между соседними подложками вместе с ничтожными размерами нанотрубок позволяют достичь скоростей записи – чтения порядка половины наносекунды. В настоящее время специалисты Nantero уже создали работающий прототип массива NRAM. В частности, компания LSI Logic заявила о готовности интегрировать NRAM-память в микропроцессор для мобильных телефонов [12].

Новая элементная база – мемристорная электроника

Более 10 лет интенсивно ведутся работы по использованию нового элемента – мемристора. Мемристор можно определить как пассивный элемент электрической цепи, сопротивление которого некоторым образом зависит от прошедшего через него заряда. После отключения напряжения в цепи мемристор не изменяет свое состояние, то есть «запоминает» последнее значение сопротивления. Другими словами, мемристор – это резистор, который помнит воздействия, приложенные к нему в прошлом, и поэтому позволяет хранить в себе информацию.

Одним из подходов по применению мемристоров являются работы по созданию искусственного интеллекта – по созданию нейронных сетей (NeuralnetWorks). Мемристоры могут быть использованы в нейронных сетях в качестве электронных синапсов. Однако вычислительные сети на мемристорах имеют несколько другую архитектуру: если в нейронных сетях имеются электронные нейроны и электронные синапсы, то в сетях мемристоров есть, условно говоря, только синапсы без нейронов.

Преимуществом сетей мемристоров по сравнению с нейронными сетями является их относительная простота и, соответственно, лучшее понимание происходящих в них процессов. На сегодняшний день разрабатывается мемристорная память, которая заменит собой современную флеш-память, жесткие диски. У такой памяти есть одно преимущество: она будет гораздо быстрее, чем обычная. Это связано с тем, что время переключения мемристора из одного состояния в другое занимает всего несколько наносекунд, в то время как запись информации в обычную память занимает порядка одной миллисекунды. Это будет очень быстрая память, которая сможет при этом хранить в несколько раз больше информа-

ции в том же объеме. Применение мемристоров предполагает в будущем кардинально изменить «облик» существующих компьютеров [8].

Заключение

Естественно, что для вуза телекоммуникационного профиля изучение материалов [8-10] в полном объеме невозможно. Но базовые знания и понятия о принципах построения новых устройств на новой элементной базе, о новых технологических принципах, перспективах развития нанотехнологий и наноэлектроники, безусловно, должны дополнить программы по изучению электроники и схемотехники для устройств телекоммуникаций и телевидения.

Литература

1. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования по специальности 11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы» (уровень специалитета). Утвержден приказом Минобрнауки РФ от 11.08.2016, №1031.
2. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (уровень бакалавриата). Утвержден приказом Минобрнауки РФ от 06.03.2015, №174.
3. Галочкин В.А. Нанотехнологии и наноэлектроника - основа знаний будущих специалистов в области телекоммуникаций и телевидения // Инфокоммуникационные технологии. Т.12, №3, 2014. – С. 85-90.
4. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. М.: Высшая школа, 1991. – 622 с.
5. Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М.: ИД «Додэка-XXI», 2005. – 528 с.
6. Опачий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника. М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 768 с.
7. Лачин В.И., Савелов Н.С. Электроника. Ростов-на-Дону: Изд-во «Феникс», 2002. – 576 с.
8. Щука А.А. Наноэлектроника. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2012. – 342 с.
9. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы наноэлектроники. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 496 с.
10. Богач Н.В. Основы наноэлектроники. Ч. 3. Наноэлектронные приборы / Севастопольский национальный технический университет, 2013 // URL <http://www.studfiles.ru/preview/5701969/> (д.о. 16.02.2017).
11. Галочкин В.А. Введение в нанотехнологии и наноэлектронику. Самара: ИУНЛ ПГУТИ, 2013. – 367 с.
12. Новинки флэш-технологии Samsung-2016. Новости. Технологии хранения данных // URL: <https://www.bytemag.ru/articles/detail.php?ID=31214>, (д.о. 16.02.2017).
13. Борзенко А. Технологии. Нанопамять. 2005 // URL <http://www.computermuseum.ru/technlgy/nanoram.htm> (д.о. 16.02.2017).

Получено 04.04.2017

Галочкин Владимир Андреевич, к.т.н., с.н.с., доцент Кафедры радиосвязи, радиовещания и телевидения Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Тел. 8-927-209-21-87. E-mail: galochkin.vladimir@yandex.ru

TEACHING MODERN ELECTRONICS AND ELECTRICAL CIRCUIT DESIGN IN THE FIELD OF TELECOMMUNICATIONS AND BROADCAST TELEVISION

Galochkin V.A.

*Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, Samara, Russian Federation
E-mail: galochkin.vladimir@yandex.ru*

In the article topical issues of teaching the basics of electronics and electrical circuit design in the field of telecommunication and broadcast television are considered. Significant scientific discoveries were made in the field of microelectronics during the last third of the 20th century, and the content of existing courses needs to be changed accordingly. Entirely new technologies and materials were developed and a new scientific direction was formed - nanoelectronic. The technological advance is evident when considering a modern transistor: carbon nanotube used in modern non-volatile memory chips is an example of an advanced technology, as well as memristor, used in neural networks of a new type. Teaching the details of these new methods and materials is not possible within a University course.

However, it is suggested by the author that at least the basic knowledge of these novel technologies should be included in a content of modern electronics and electrical circuit design courses.

Keywords: nanotechnology, nanoelectronic, circuit design, transistor, telecommunications

DOI: 10.18469/ikt.2017.15.4.16

Galochkin Vladimir Andreevich, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, 23 L. Tolstoy, Samara, 443010, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Radio Communication, Radio Broadcasting and Television; PhD in Technical Science, senior research assistant. Tel.: +79272092187. E-mail: galochkin.vladimir@yandex.ru.

References

1. The Ministry of Education and Science Russian Federation. Federalnii gosudarstvennii obrazovatel'nyi standart visshchego obrazovaniya po specialnosti 11.05.01 «Radioelektronnie sisteny i kompleksi (uroven specialiteta)» [Federal state educational standard of higher education in the specialty 11.05.01 «Radio-electronic systems and complexes» (specialty level)]. Moscow, no. 1031, 2016, 35p.
2. The Ministry of Education and Science Russian Federation. Federalnii gosudarstvennii obrazovatel'nyi standart visshchego obrazovaniya po napravleniu podgotovki 11.03.02 «Inphocommunicacionnie tehnologii i sistemy svyazi (uroven bakalvriata)» [Federal state educational standard of higher education in the direction of preparation 11.03.02 «Information and Communication Technologies and Communications System» (undergraduate level)]. Moscow, no. 174, 2015. 13 p.
3. Galochkin V.A. Nanotekhnologii i nanoelektronika – osnova snanii budushchich specialistov v oblasti telekommunicatii i televeshchaniya [Nanotechnology and nanoelectronics are the basis of knowledge of future specialists in the field of telecommunications and television broadcasting.] *Infokommunikacionnie tehnologii*, 2014, Volume 12, no 3, pp. 85-90.
4. Gusev V.G., Gusev J.M. *Elektronika: Uchebnoe posobie dlja priborostroitel'nykh vusov* [Electronics: A Textbook for Instrument-Making Institutes of Higher Education. 2nd ed]. Moscow, Vishchaja shchkola Publ., 1991. 622 p.
5. Volovich G.I. *Schemotekhnika analogovich i analogo-zifrovich elektronich ustroystv* [Circuitry of analog and analog-digital electronic devices]. Moscow, Isdatelskii dom «Dodeka – XXI», 2005. 528 p.
6. Opadchii J.F., Gludkin O.P., Gurov A.I. Analogovaja i zifrovaja elektronika: uchebnik dlja vusov [Analog and Digital Electronics: A Training Manual for Universities]. Moscow, Gorjachaja linija – Telecom Publ., 2005. 768 p.
7. Lachin V.I., Savelov N.S. *Elektronika: Uchebnoe posobie* [Electronics: A Tutorial. 3d ed]. Rostov on Don, Phoenix Publ., 2002. 576 p.
8. Shchuka A.A. *Nanoelektronika* [Nanoelectronics 2nd ed]. Moscow, Binom. Laboratoriya snanii Publ., 2012. 342 p.
9. Dragunov V.P., Neisvestnii I.G., Gridchin V.A. *Osnovi nanoelektroniki* [Fundamentals of nanoelectronics. 2nd ed]. Novosibirsk, Novosibirskii gosudarstvennii tekhnicheskii universitet Publ., 2004. 496 p.
10. Bogach N.V. *Osnovi nanoelektronik. Chast 3. Nanoelektronnie pribori* [Fundamentals of nanoelectronics, (electronic resource) Part 3. Nanoelectronic devices]. Sevastopolskii nacionalnii tekhnicheskii universitet, 2013. Available at: <http://www.studfiles.ru/preview/5701969/> (accessed 16.02.2017).
11. Galochkin V.A. *Vvedenie v nanotekhnologii i nanoelektroniku* [Introduction to nanotechnology and nanoelectronics]. Samara, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics Publ., 2013. 367 p.
12. Novinci flesch-tehnologii Savsung-2016. Novosti. Tehnologii chraneniya dannich [New Flash Technologies Samsung-2016- [Electronic resource]: News. Technology of data storage]. Available at: <https://www.bytemag.ru/articles/detail.php?ID=31214> (accessed 16.02.2017).
13. Borsenko A. *Tehnologii. Nanopamyat -2005* [Technologies. Nanopamyat – 2005]. Available at: <http://www.computermuseum.ru/technlgy/nanoram.htm> (accessed 16.02.2017).

Received 04.04.2017