

ТЕХНОЛОГИИ

УДК 538.945

**КАФЕДРА ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ —
НАРОДНОМУ ХОЗЯЙСТВУ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

А.П. ДОСТАНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 14 декабря 2003*

Представлены основные этапы развития кафедры ЭТТ, ее научные и производственные достижения, роль и место в подготовке специалистов с высшим образованием и специалистов высшей научной квалификации.

Ключевые слова: электронная техника, технология, аппаратостроение, медицина, проектирование.

Введение

Наряду с 40-летием Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники в 2004 г. исполняется 30 лет со дня основания кафедры технологии радиоэлектронной аппаратуры, впоследствии переименованной в кафедру современных электронных технологий, а затем — в кафедру электронной техники и технологии (ЭТТ). На протяжении всего периода кафедра интенсивно развивалась и стала маточным цехом профессионального образования и воспитания инженерных кадров с технологической специализацией, производства и внедрения в народное хозяйство СССР и Республики Беларусь научных результатов, подготовки кадров высшей научной квалификации в области наукоемкой техники и высоких технологий радиоэлектронного, электроннооптического и медицинского профилей.

Кафедра ЭТТ осуществляет подготовку инженеров для народного хозяйства Республики Беларусь в области высоких технологий по следующим специальностям: "Проектирование и производство радиоэлектронных средств" (специализации "Технология микроэлектронного оборудования", "Медицинская электронная техника", "Технология микроэлектронной аппаратуры", "Технология электронной аппаратуры"), "Электронно-оптическое аппаратостроение", "Медицинская электроника". Высокое качество подготовки обеспечивается в первую очередь высококвалифицированным профессорско-преподавательским составом. Это такие широко известные ученые в Республике Беларусь и за рубежом, как академик НАН Беларуси, д-р техн. наук., проф. А.П. Достанко, чл.-кор. НАН Беларуси, д-ра техн. наук, проф. Л.И. Гурский, В.А. Емельянов и д-ра техн. наук, проф. Л.П. Ануфриев, В.В. Баранов, В.А. Бурский, С.П. Кундас, А.А. Хмыль, И.В. Шут, доц. С.В. Бордусов, С.В. Грушецкий, В.Л. Ланин, Н.Е. Левчук, Б.Г. Максимов, А.Н. Осипов, Е.К. Станишевский, В.Я. Ширипов, В.В. Шаталов, Я.В. Шатило, Г.М. Шахлевич и др.

Под их руководством и при непосредственном участии по всем специальностям разработаны образовательные стандарты, а по базовым курсам — учебно-методические комплексы, которые содержат учебники или учебные пособия, конспекты лекций, методические указания по лабораторным и практическим занятиям, методические пособия по курсовому и дипломно-

му проектированию. Многие из них являются авторскими и включают в себя не только современные достижения науки и техники, но и результаты персональных исследований. На кафедре разработан комплекс учебно-методических и научно-педагогических средств поддержки дисциплин учебного цикла физико-химических основ и технологии микроэлектроники и создан алгоритм построения таких комплексов, включающий совместное системное и целенаправленное использование компьютерных программ по дисциплине, технических средств обучения, позволяющих визуализировать эти программные продукты и проблемно-ориентированного педагогического видеоряда, включающего системную и логическую последовательность компьютерных и видеофрагментов по отдельным разделам учебных дисциплин цикла, натуральных образцов, специализированных планшетов-стендов и методической литературы. Разработаны сценарии и осуществлены натурные видеосъемки в условиях реального промышленного производства ("чистые" технологические модули НПО "Интеграл") конкретной реализации отдельных технологических процессов. За разработку учебно-методического комплекса проф. кафедры А.П. Достанко, А.А. Хмыль и М.И. Пикуль удостоены звания лауреатов Государственной премии РБ. Подготовка и издание учебников и учебных пособий проф. А.А. Хмыля, доц. В.Л. Ланина получили поддержку Президента Республики Беларусь.

В соответствии с перспективными и годовыми планами развития кафедры с целью реализации научно-исследовательского принципа обучения преподавателями, учебно-вспомогательным персоналом, аспирантами, студентами и соискателями проводится большая работа по развитию материальной базы кафедры. Создан комплекс технологических и диагностических лабораторий, оснащенных компьютеризированным оборудованием высокого уровня, современными методиками контроля и управления параметрами технологических сред, измерения свойств изготавливаемых изделий, макетами, мультимедийными средствами, что позволяет студентам изучить базовые технологические процессы производства изделий микроэлектронной техники.

На кафедре широко используется научно-исследовательский принцип обучения. Уже на I курсе студенты закрепляются за преподавателями и научными сотрудниками кафедры, знакомятся с научными направлениями, достижениями и проблемами. Каждый студент закрепляется за научным руководителем и таким образом создаются научные группы из студентов разных курсов и научных сотрудников. Участвуя в выполнении заданий хозяйственных и госбюджетных тем, студенты приобретают опыт научной работы, разработки КД и ТД по требованиям ГОСТ, выполняют реальные курсовые и дипломные проекты, готовят научные публикации, получают материальное вознаграждение за свою работу, участвуют в различных конкурсах. Например, студентам Е.Г. Панерно (V курс), А.В. Шидловскому (III курс) и А.Б. Григорашу (III курс) присуждены медали Академии наук СССР за "Разработку и исследование электронных тепловизорных систем для бесконтактного измерения температуры нагретых объектов" и др. Ряд работ, выполненных студентами, признаны изобретениями, запатентованы в США, ФРГ, Франции. В 2000 г. аспирантке Т.А. Кашко, студентам Б.А. Тонконогову, С. Левашкевичу, А. Лемзикову присуждена премия Президента РБ для одаренных учащихся и студентов.

Кафедре с согласия Совета Министров Республики Беларусь в порядке эксперимента был предоставлен статус самостоятельного учебно-научного структурного подразделения университета с элементами хозрасчетной деятельности (1993–2002 гг.). Научная деятельность кафедры осуществлялась в рамках созданного при ней научно-исследовательского комплекса (НИК). Это обеспечило тесную связь учебного процесса с наукой и подготовкой кадров высшей научной квалификации, эффективное использование научно-исследовательского оборудования научных лабораторий в учебном процессе, концентрацию усилий ученых целой школы для комплексного решения проблем в области образования и науки, финансовую поддержку студентов и аспирантов путем привлечения их к НИР. Такая форма организации науки и учебного процесса в рамках кафедры привела к динамичному развитию научной школы по электронной технике и технологиям в тесной взаимосвязи с учебным процессом.

Развитию студенческой науки и улучшению качества подготовки молодых специалистов способствуют организация учебно-научно-производственных объединений БГУИР – НПО "Интеграл", БГУИР – МПО ВТ, а также научно-исследовательских лабораторий двойного

подчинения. В этих структурных подразделениях студенты не только знакомятся и изучают современную производственную и исследовательскую базу предприятий, но и выполняют реальную производственную работу и исследования, необходимые для предприятий. Кроме того, ведущие специалисты предприятий читают лекции для студентов, знакомят с перспективами развития отрасли и конкретного завода, подбирают среди студентов талантливых ребят и готовят их для работы на этом предприятии. Высокий уровень подготовки молодых специалистов, их способность к научным исследованиям гарантируют выпускникам кафедры хорошо оплачиваемые рабочие места после окончания университета.

Выпускники кафедры могут работать научными сотрудниками, конструкторами, технологами, наладчиками сложной производственной, исследовательской и медицинской техники. Они востребованы и работают на многих предприятиях нашей республики и в странах ближнего и дальнего зарубежья (Россия, США, Канада, Германия, Голландия, Южная Корея, Мексика и др.).

При определении научного направления кафедра исходила из того, что значительная доля научно-технического прогресса принадлежит таким отраслям народного хозяйства, как радиоэлектроника, вычислительная техника, системы управления и средства связи, развитие которых в большой степени зависит от успехов микроэлектроники. Без изделий микроэлектроники стало невозможным обеспечение качественного и своевременного выпуска важнейших видов продукции народного хозяйства, удовлетворение культурных и социальных потребностей. Многие ученые и государственные деятели считают, что уровень развития общества во многом зависит от уровня технологии и широты применения изделий микроэлектроники. В свою очередь, повышение эффективности производства изделий микроэлектроники, их функциональные сложности, качество и надежность определяются совершенством технологии, возможностями интенсификации базовых технологических процессов, созданием высокоэффективного прецизионного технологического оборудования с компьютерным контролем и управлением.

Неотъемлемой частью каждого изделия микроэлектроники является пленочная токопроводящая система, обеспечивающая коммутацию вплоть до миллионов элементов нано- и микронных размеров на ограниченных площадях полупроводникового кристалла. Для создания такой системы необходимы сотни операций, проводимых в различных контролируемых технологических средах дозированными потоками энергии при высокой точности контроля температуры, химического состава и других параметров в зоне реакции. Технология и материаловедение пленочных токопроводящих систем изделий микроэлектроники как самостоятельное научное направление оформилось на кафедре с 1970 г. и получило признание научной общественности.

По этому направлению были созданы отраслевая научно-исследовательская лаборатория МЭП СССР (технология создания микрогетерогенных структур радиационными электрофизическими методами), отдел ионно-лучевого и СВЧ плазменного синтеза тонкопленочных структур проблемной лаборатории стохастических вычислительно-моделирующих систем, научно-производственные лаборатории двойного подчинения МРТИ – НПО "Интеграл", МРТИ – ПО "Коралл", МРТИ – МПО им. В.И. Ленина, БГУИР – МПО ВТ, которые призваны создавать теоретические основы, определяющие закономерности, разрабатывать активированные технологические среды, прецизионное технологическое оборудование, диагностические системы и на их основе комплекс "мокрых" и "сухих" технологических процессов, начиная от подготовки поверхности полупроводниковых подложек, нанесения одно- и многокомпонентных проводящих и диэлектрических слоев, распределения примесей между контактными слоями и в полупроводнике, локального удаления слоев из микронных и субмикронных областей, защиты кристаллов от внешних воздействий и кончая сборкой, герметизацией и испытанием изделий.

На кафедре создано прогрессивное научно-техническое направление "Программно-управляемый синтез микрогетерогенных многофункциональных слоистых структур радиационными электрофизическими методами". Удалось внести существенный вклад в изучение условий возникновения коллективных колебательных процессов в плазме паров металлов, установление закономерностей зародышеобразования и роста пленочных слоев в условиях электронной и ионной бомбардировки частицами конденсирующихся потоков; создать физико-

технологические основы скоростного СВЧ-плазмохимического фрезерования микрорисунков кристаллов ИС; выдвинуть и развить идеи управления энергетическим барьером в контактах Шоттки путем селективного ионного распыления многокомпонентных поверхностных слоев перед конденсацией металла; разработать принципы создания модульных ионно-лучевых систем для металлизации изделий микро- и оптоэлектроники. При помощи оригинального диагностического оборудования со встраиваемыми ионно-лучевыми моделями впервые был экспериментально обнаружен эффект восходящей диффузии легкой компоненты в пленочных системах. Подтверждена идея временной модуляции интенсивности ионного пучка с целью управления составом формируемых многокомпонентных слоев металлов и диэлектриков. Новые экспериментальные результаты легли в основу создания интегральных методов плазменной и ионно-лучевой обработки поверхности, получения качественно новых свойств пленочных элементов кристаллов СБИС, мощных лазерных устройств отображения информации, изделий оптического назначения, изделий СВЧ техники и позволили создать целую серию технологических устройств СВЧ-плазмохимической и ионно-лучевой обработки для серийного производства изделий микроэлектроники, радиотехники, лазерных систем, высокоточных измерительных приборов.

Создана теория контактных явлений в многокомпонентных пленочных системах на монокристаллах полупроводников; физико-технологические основы введения в пленочные системы компонентов, выполняющих строго определенные функции на различных участках многофункциональной структуры интегральных схем; впервые обнаружено и описано физическое явление фазового расслоения. Полученные новые экспериментальные результаты легли в основу построенных физических моделей отказов пленочных контактов на основе сплавов и химических соединений при наличии градиентов концентраций и внутренних напряжений, позволили выявить эффективные пути стабилизации поверхности контактных границ раздела, разработать технологию и конструкцию многокомпонентных мишеней из силицидов, боридов и нитридов тугоплавких металлов и на этой основе создать целую серию технологий и материалов для формирования одно- и многоуровневых токопроводящих систем и сборочных процессов, защищенных целым рядом авторских свидетельств (В.В. Баранов, В.Я. Ширипов, В.В. Шаталов, И.В. Сवादковский).

Разработаны физико-технологические основы получения пленок благородных металлов и их заменителей в условиях нестационарного электролиза, установлены принципы применения мощных псевдофокусированных потоков инфракрасного излучения в прецизионной технологии микроэлектроники, взаимодействия их с пленками различной лучевоспринимающей способности, установлены закономерности локального нагрева пленочных структур, что позволило создать на их основе высокопроизводительное технологическое оборудование для твердотельной электроники, оптики, радиотехники.

В этом широком и разнообразном комплексе сложнейших проблем микроэлектроники чрезвычайно важную роль играет поверхность. На базе теоретических и экспериментальных исследований влияния поверхностных загрязнений на качество и надежность изделий микроэлектроники, механизмов десорбции, комплексообразования и пассивации поверхности определены наиболее высокоэффективные, интенсифицирующие процесс жидкие технологические среды и режимы для финишной подготовки поверхностей полупроводниковых структур с учетом их особенностей и масштаба производства. Например, разработанная технология перекисно-аммиачной отмывки полупроводниковых пластин позволила снизить токи утечки, улучшить параметры и повысить надежность СВЧ-транзисторов, а введение в перекисно-аммиачный раствор фосфоорганических комплексообразователей (лучшие результаты получены при использовании триаммонийной соли оксиэтилидендифосфоновой кислоты — ТАС СЭДФ) — повысить процент выхода годных больших (БИС) и сверхбольших интегральных схем (СБИС). Разработана также технология высокоэффективной очистки с использованием неионогенных поверхностно-активных веществ (НПАВ), позволяющих значительно интенсифицировать процесс.

Разработанные оригинальные технологические процессы очистки поверхности кристаллов, защищенные авторскими свидетельствами, наряду с оптимизацией технологии по специ-

ально созданному математическому обеспечению и программам многофакторного планирования эксперимента внедрены в серийное производство (В.П. Василевич).

Анализ физических принципов нанесения, удаления и перераспределения вещества в твердом теле показал, что большие перспективы открываются при использовании в этих целях плазмы, созданной в различных технологических средах (нейтральных и химически активных газах, парах металлов). Разработаны теоретические основы формирования токопроводящих систем из плазмы в парах металлов в условиях бомбардировки растущей пленки высокоэнергетическими ионами ($E \geq 3$ кэВ), необходимое для реализации оборудование. Проведены глубокие экспериментальные исследования в парах металлов, сплавов, различных химических соединений, определены оптимальные режимы создания токопроводящих систем с псевдодиффузионными переходными слоями толщиной 5–10 нм (М.И. Пиккуль, Н.Е. Левчук, В.Я. Ширипов).

Теоретически обоснованы процессы взаимодействия ионных пучков с поверхностью твердого тела сложного состава. Полученные результаты были положены в основу созданных ионных процессов формирования многокомпонентных пленочных элементов ИС и полупроводниковых приборов. Особенностью разработанных процессов является их интегральный характер, заключающийся в проведении в одном вакуумном цикле нескольких логически связанных операций без контакта полупроводниковой структуры с внешней средой. Правильное применение специфических особенностей ионной обработки в совокупности с принципами интеграции процессов позволило значительно улучшить характеристики формируемых с их помощью приборов (И.В. Сवादковский, С.М. Завадский, Д.А. Голосов).

Для реализации созданных методов ионной обработки были разработаны многоручевые модульные ионные ускорители, позволяющие проводить операции ионной очистки, ионного распыления мишеней, ионного покрытия, ионной имплантации, обладающие широкими функциональными возможностями. Создан ряд ионно-лучевых и ионно-плазменных устройств для технологии формирования тонких пленок: двухлучевые ионные источники, распыляющие ионные источники для нанесения широчайшего класса материалов, ионные источники для ионно-ассистированного нанесения, магнетронные распылительные системы и несбалансированные магнетронные распылительные системы мощностью от 1 до 9 кВт с размером мишени от 8 до 60 см.

С применением данных устройств разработаны технологии ионно-лучевого и ионно-плазменного формирования тонких пленок, такие, как ионно-лучевое распыление, двойное ионно-лучевое распыление, ионно-ассистированное нанесение (IBAD), реактивное магнетронное распыление, несбалансированное магнетронное распыление, ионно-ассистированное магнетронное распыление (IBAM) (И.В. Сवादковский, С.М. Завадский, Д.А. Голосов).

В рамках одного из научных направлений кафедры "Ионно-лучевые и плазменные процессы и вакуумное оборудование" в 1992 г. группой сотрудников научно-исследовательского комплекса кафедры СЭТ под руководством канд. техн. наук, доц. В.Я. Ширипова была создана научно-техническая фирма "ИЗОВАК", которая активно проводит научные исследования по этой проблеме, принимает участие в международных конференциях, например, в г. Сеуле (Южная Корея), Брауншвейге (Германия), Орландо (США), выставке-конференции в Тайпее (Тайвань) и др. За десятилетие с момента основания фирма по объемам производства стала крупнейшим в СНГ разработчиком, производителем и экспортером вакуумной напылительной техники дисплейного назначения (в настоящее время насчитывает более 80 штатных сотрудников). Наиболее значимый научно-технический результат деятельности фирмы за последние годы — создание и серийный выпуск гибких производственных систем на базе вакуумных модульных сканеров как альтернативы поточным линиям. Выпускаемая под руководством В.Я. Ширипова техника защищена рядом международных патентов.

Разработанные на кафедре ионно-плазменные устройства и технологии для формирования тонких пленок были внедрены на ряде предприятий и в научно-исследовательских лабораториях Республики Беларусь и других стран. В частности, создана ионно-лучевая установка и техпроцесс формирования диэлектрических покрытий для ИС на арсениде галлия, разработан технологический процесс формирования многослойных просветляющих покрытий и конструкции фильтров для экранов ПЭВМ, модульные установки вакуумного нанесения тонкопленочных покрытий. Разработаны технологический процесс формирования ПЭП ионно-лучевыми

методами, технологический процесс формирования высокоадгезионных металлических покрытий для квантоскопов, которые внедрены на НПО "Платан". Создан технологический процесс ионно-лучевого формирования ПЭГ на ЛНД "Плазма", который используется на заводе "Ритм" (г. Речица). По заказу ГНИПИ разработаны шлюзовые устройства для вакуумных установок непрерывного действия и др.

В последние годы в рамках Государственной научно-технической программы "Диагностика, медицинская техника и оборудование" разработаны и изготовлены тепловыделяющие элементы на гибких и жестких носителях и автоматизированный комплекс для их производства. Разработан способ получения алмазоподобных покрытий (АПП) для защиты и просветления ИК германиевой оптики, где в качестве источника углерода используется комбинация реакции диссоциации углеводородов в плазме тлеющего разряда МРС и ионного распыления графитовой мишени. Применение АПП позволило повысить пропускание германиевого окна до 92% на длине волны 10,5 мкм. Созданы физико-технические предпосылки для разработки технологических процессов формирования многослойных тонкопленочных структур на базе DLC слоев для оптоэлектронного и биомедицинского назначения. Разработана методика расчета и проектирования магнетронных распылительных систем несбалансированного типа, которая связывает геометрические параметры магнетронной распылительной системы с его разрядными характеристиками.

С использованием этих результатов заключен договор о научно-техническом сотрудничестве с Thin films research laboratory Xian Institute of Technology (г. Сиань КНР). Практическое применение результатов было представлено на выставке в Сирийской Арабской Республике (2001 г.) и Ганноверской промышленной выставке (Германия, 2002 г.) (И.В. Свадковский, С.М. Завадский, Д.А. Голосов).

Разработан метод формирования субмикронных контактных окон в диэлектрике многоуровневой токопроводящей системы БИС и СБИС, в котором благодаря применению дополнительной маски из ванадия с последующим ее травлением в ультразвуковом поле и плазменном травлении диэлектрика в ВЧ плазме обеспечивается управление профилем контактных окон. Тем самым достигается высокий коэффициент запыления контактных окон вторым уровнем металла токопроводящих систем и, как следствие, существенным образом повышается надежность и процент выхода годных схем. Проведена модификация конструкции установки травления диэлектрических покрытий в ВЧ плазме, позволяющая значительно увеличить скорость травления за счет введения регулируемого зазора между электродами в областях нахождения обрабатываемых пластин.

С целью защиты ТС от внешних воздействий проведены теоретические и экспериментальные исследования, сформулированы основные принципы процесса создания низкотемпературной технологии локального окисления алюминия в высокоомной среде. Технология обеспечивает высокую чистоту, необходимый комплекс свойств оксидных пленок, равномерность по глубине и площади окисления, воспроизводимость результатов, высокую производительность и хорошее согласование с базовыми процессами производства биполярных ИС.

В значительной мере производительность и качество изделий микроэлектроники определяют физико-термические процессы, поэтому интенсификация лучистого теплообмена, являющегося основным механизмом теплопередачи, позволяет значительно повысить эффективность высокотемпературных технологических процессов. В основу метода, позволяющего интенсифицировать лучистый теплообмен, положена разработка высокотемпературных излучателей и термического оборудования, обеспечивающего высокотемпературный нефокусированный нагрев коротковолновым инфракрасным излучением (ИК) изделий микроэлектроники (М.Х.-М. Тхостов).

Проведенные экспериментальные исследования, полученные аналитические зависимости и математические модели позволили впервые создать и внедрить в серийное и массовое производство технологические процессы и оборудование ИК нагрева для герметизации полупроводниковых приборов и ИС, селективно поглощающих тепловое излучение. Создано высокопроизводительное оборудование ИК нагрева для сборки изделий микроэлектроники. Линиями сборки ДРМ 2220013, ДРМ 2220015, ДРМ 2220016 полностью переоснащен цех ПО "Интеграл" с ежедневным выпуском около 1 млн изделий полупроводниковой электроники. Внедре-

ние разработанного оборудования и технологических процессов позволило высвободить значительное количество рабочих, сэкономить дефицитные материалы графит и керамику, сократить производственные площади, снизить расходы на изготовление оборудования, повысить процент выхода годных и улучшить культуру производства, а также уменьшать загрязнение окружающей среды.

Показано, что оборудование ИК нагрева может найти широкое применение в точном машиностроении, электровакуумной, радиотехнической и электронной промышленности для скоростной термической обработки, формирования различных микро- и макроспаев, осуществления групповой пайки и решения других задач, в том числе в других отраслях народного хозяйства (В.В. Баранов, М.Х.-М. Тхостов).

Существенной особенностью технологических процессов микроэлектроники является то, что они характеризуются большим числом взаимосвязанных параметров, особенно важным из которых является температура. По этому направлению созданы теоретические основы построения тепловизионных пирометрических систем (ТПС) на базе телевизионных инфракрасных передающих трубок; разработан комплекс электронной аппаратуры для анализа и расшифровки тепловизионных изображений, характеризующих тепловое распределение на поверхности контролируемого технологического объекта для измерения температуры в любой заданной точке исследуемого теплового изображения. Она позволяет бесконтактным путем получать данные не только о температурном состоянии поверхности технологического объекта (например, полупроводниковые пластины), но и судить о его внутреннем состоянии (концентрации примеси в процессе диффузии, получении пленки заданной толщины в процессе пиролиза нитрида кремния и т.д.) (Н.И. Домаренко, В.М. Марченко).

В 1999–2003 гг. на основании протокола поручений Президента РБ и постановлений Правительства в Беларуси выполнен инновационный проект по разработке технологии производства поликристаллического кремния из побочного продукта переработки апатитов. Головной организацией-исполнителем проекта явилась кафедра ЭТТ БГУИР, научные руководители проекта — акад. НАН Беларуси А.П. Достанко и проф. В.П. Василевич. В выполнении работ по проекту принимали участие: Гомельский химический завод, Новополоцкий завод "Измеритель", ООО "Пластма", Минский НИИ радиоматериалов, Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, в состав научного коллектива привлекалось более 50 ученых и специалистов. Проект получил финансовую поддержку программы НАТО "Наука для мира", признан отечественными и зарубежными специалистами и организациями: ВНИИХТ, Минатом РФ, г.Москва; Гиредмет, г.Москва; Запорожский титано-магниевого комбинат, Украина; "Bayes-Solar", Леверкузен, ФРГ; IMEC Vzw., Лювен, Бельгия.

В рамках проекта выполнена лабораторная стадия развития процессов и аппаратов по получению поликристаллического кремния из фторсиликата – кремнефторида натрия (КФН), произведенного Гомельским химическим заводом из побочного продукта производства фосфорных удобрений. Гомельский химический завод подтверждает возможность производства КФН в объемах до 5 000 т ежегодно по отпускной цене 130–140 USD/т. Это позволит производить до 500 т в год поликристаллического кремния. Техничко-экономическое обоснование инвестиций в создание такого производства характеризует разработанную технологию как экологически чистую (нет выбросов вредных веществ в атмосферу и сточные воды), низкоэнерготартную (20 кВт·ч/кг). Выделяемые побочные продукты NaF и CaF₂ имеют стабильный потребительский спрос и могут быть включены в состав товарной продукции. Общие инвестиционные затраты на создание производства поликристаллического кремния на базе завода "Измеритель" в г. Новополоцке оцениваются в 28 млн USD, из которых машины и оборудование — 17 млн USD, производственные здания и сооружения — 8 млн USD. Техничко-экономические показатели проекта: годовой выпуск кремния — 500 т, годовой расход энергоресурсов — 20 млн кВт·ч, численность ППП — 445 человек при рентабельности реализации 38,3%, себестоимости 1 кг кремния 16,2 USD и сроке окупаемости 5,3 года позволяют характеризовать инвестиции, как выгодное вложение капитала. Анализ примесного состава кремния, выполненный аккредитованным испытательным центром в Гиредмет (г. Москва), анализ полупроводниковых свойств материала и его опробование в производстве солнечных элементов, выполненные бельгийским центром микроэлектроники IMEC (г. Лювен), позволили сделать вывод о целесообраз-

ности применения разработанной технологии в промышленном производстве. Индустриализация результатов проекта создает следующие технико-экономические предпосылки:

расширить товарную номенклатуру Гомельского химического завода, улучшить экологическую обстановку в регионе за счет использования побочного продукта производства;

организовать на базе Новополоцкого завода "Измеритель" экспортоненаправленное крупномасштабное (500 т в год) производство поликристаллического кремния для промышленности ФЭП, что создаст дополнительные высококвалифицированные рабочие места в Полоцком регионе Витебской области;

провести импортозамещение потребляемого монокристаллического кремния на продукцию собственного производства, что будет способствовать экономической безопасности предприятия НПО "Интеграл";

создать дополнительные рабочие места и расширить товарную номенклатуру градообразующего предприятия "Камертон" в г. Пинске.

На кафедре также проводятся научные исследования по направлению: "Разработка терапевтических и диагностических систем, включая сложные медицинские системы с биологической обратной связью и медицинские информационные системы".

Разработаны теоретические основы синтеза медицинских электронных систем с биологической (БОС) и биотехнической (БТОС) обратными связями. Предложен новый подход, основанный на объединении и согласованном взаимодействии БОС и БТОС с помощью современных компьютерных и информационных технологий, способствующий развитию теории и практики медицинских систем с обратной связью, совершенствованию методов цифровой обработки биомедицинских сигналов, методов электростимуляционной терапии и функциональной диагностики. На кафедре созданы наукоемкие аппараты и системы (Н.И. Домаренок, А.Н. Осипов, И.Г. Мороз, М.Х.-М. Тхостов, С.К. Дик):

аппарат магнитоимпульсной терапии МИУТ-1 — предназначен для лечения широкого круга заболеваний, прошел клинические испытания, получил положительные отзывы медицинских работников, защищен патентами США и Евросоюза;

портативный аппарат стерилизации хирургического инструмента на основе использования ИК-излучения — внедрен на ПО "Интеграл";

гнотобиологическая камера — предназначена для ускорения репаративных процессов;

аппараты ионизации воздушной среды — используются рядом санаторно-курортных учреждений РБ (санаторий-профилакторий "Беларусочка", "Случь" и др.);

информационно-квалификационные системы врача-гастроэнтеролога, врача-детского хирурга — разработаны с участием специалистов Белорусской медицинской академии последипломного образования (БелМАПО) и используются в Республиканском детском хирургическом центре (РДХЦ) и БелМАПО;

компьютерная обучающая система для врача иглорефлексотерапевта - создана совместно с кафедрой иглотерапии БелМАПО и используется на ней;

компьютерная программа измерения геометрических параметров УЗ и рентгеновских изображений — применяется в РДХЦ.

По указанному направлению кафедрой организованы и проведены две международные научно-технические конференции "Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии. Медэлектроника".

Открыта подготовка магистров по специальностям "Медицинская электроника", "Проектирование и производство РЭС", "Электронно-оптическое аппаратостроение".

Кафедра ЭТТ БГУИР на протяжении более 20 лет является головным исполнителем комплексно-целевых и научно-технических программ народно-хозяйственного комплекса по решению приоритетных для Республики Беларусь проблем (18.01р "Металлизация", 27.03р "Технология", "Диагностика", "Диагностика, медицинская техника и оборудование", "Техническая диагностика"), межвузовских программ фундаментальных исследований в области естественных наук ("Стимуляция", "Пучковые взаимодействия", "Наукоемкие технологии") (научный руководитель проф. Достанко А.П.).

Силами научного коллектива и сотрудников кафедры успешно выполнялись задания и проекты программ АН БССР ("Кристалл 2.33", "Плазма 07", "Электромагнетизм"), АН СССР

("Гетеропереход"), Госкомитета по науке и технике ("Микропроцессоры и микро-ЭВМ"), Государственных научно-технических программ ("Защита поверхностей", "Технология", "Алмазы", "Инструменты"), Государственных программ ориентированных фундаментальных исследований ("Кристаллофизика", "Материал", "Плазмодинамика", "Электроника", "Энергия", "Вещество -2"), проекта по линии INTAS, проекта в программе НАТО "Наука для мира", проекта ННТЦ "Разработка технологии получения полупроводникового кремния из вторичного сырья Гомельского химического завода", контракта с КНР.

Благодаря получению новых результатов удалось наладить производство ряда новых БИС и СБИС, усовершенствовать технологию более 60 типов изделий микроэлектроники (дискретные полупроводниковые приборы, БИС и СБИС), нового технологического оборудования. Результаты работы широко апробированы и внедрены на предприятиях страны: НПО "Интеграл", МПО им. В.И. Ленина, НПО "Планар", ПО "Горизонт", г. Минск; ПО "Коралл", г. Гомель; ПО "Электроника", г. Воронеж; ПО "Планета", г. Новгород; завод "Озон", г. Баку, завод "Мезон", г. Кишинев; п/я Р-60П, г. Киев; НИИИТ, г. Калининград Московской обл.; ФТИ им. А.Ф. Иоффе АН СССР, г. Ленинград; завод им. 50-летия СССР, г. Фрязино; опытно-экспериментальный завод, г. Грозный; ПО "Светлана", г. Ленинград; ВНИИМЭТ, г. Калуга; НИИ "Волна", г. Саратов; завод "Ритм", г. Речица; ЦКБ "Пеленг", г. Минск; НИИ-40, КНР и др. В серийном и массовом производстве выпущено несколько миллиардов изделий микроэлектроники.

Научная новизна работы подтверждена многочисленными (около 500 шт.) изобретениями. Несколько десятков изобретений внедрены в серийное и массовое производство, 40 — в учебную и научную практику, ряд из них - высокоэффективные. Изобретения запатентованы в США, Швеции, Франции, Японии, ФРГ. Кроме того, в производстве используются 25 рационализаторских предложений, а в научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработках — математические программы, реализующие методы математической статистики, планирования эксперимента и моделирования процессов при производстве изделий электронной техники и изделий другого назначения.

По научному направлению "Теория и разработка новых, высокоэффективных, экологически чистых, ультразвуковых технологических процессов и оборудования для изготовления прецизионных и микроминиатюрных изделий" разработаны (М.Д. Тявловский., С.П. Кундас, В.Л. Ланин, М.Н. Лось):

теоретические основы нового ультразвукового высокопроизводительного безотходного технологического процесса изготовления прецизионных проволок, лент и спиралей из тугоплавких и легкоокисляющихся металлов и сплавов;

технология и оборудование для изготовления прецизионных лент различных профилей методом горячей ультразвуковой микроковки в вакууме;

новые ультразвуковые технологические процессы и высокопроизводительное автоматическое оборудование для ультразвукового лужения и пайки стеклокерамических конденсаторов с алюминиевыми прокладками;

ультраульковые технологические процессы и автоматизированное оборудование для бесфлюсовой ультразвуковой пайки микрополосковых плат в дюралюминиевые корпуса многофункциональных модулей СВЧ, широко применяемых в специальных приборах и космической технике;

ультраульковые технологические процессы и оборудование для высокопрочного склеивания компонентов приборов ферритовых СВЧ;

ультраульковые технологические процессы и оборудование для ультразвуковой высококачественной очистки прецизионных изделий в микроминиатюрном исполнении, а также финишной очистки деталей оптических приборов;

ультраульковые технологические процессы и оборудование для ультразвуковой отделочно-упрочняющей обработки поверхностей металлических деталей.

Применительно к теории плазменного напыления порошкообразных материалов предложена и практически реализована имитационная модель процесса, которая базируется на математическом описании поведения частиц порошка в плазменной струе и при взаимодействии с

основанием в соответствии с физической и логической последовательностью протекающих процессов (С.П. Кундас).

Модель формирования структуры плазменных покрытий разработана на основе детерминированного и статистического подхода (метод Монте-Карло). Первый подход предполагает расчет траектории и координаты попадания на основание каждой частицы, при втором подходе распределение частиц порошка в плазменной струе, их скоростей и диаметров, координат попадания на основание описывается с помощью вероятностных законов, что существенно снижает требования к производительности применяемых при моделировании вычислительных средств при некотором уменьшении точности результатов моделирования, которая все же остается приемлемой для практических задач. Разработанный программный комплекс, который является универсальным средством, позволяющим при наличии базы данных свойств, применяемых порошковых материалов эффективно использовать его для исследования и разработки технологий плазменного напыления различных видов покрытий с минимальными затратами времени на технологическую подготовку производства. Разработан также интегрированный технологический комплекс для исследования и практической реализации процессов плазменного формирования покрытий. В его состав входит разработанное программно-математическое обеспечение, комплект измерительной аппаратуры, средства для компьютерного управления режимами напыления.

Практическое применение комплекса позволяет сократить время на технологическую подготовку производства новых изделий, снизить затраты на материалы и газы, улучшить условия труда инженеров-технологов.

Под руководством профессора С.П. Кундаса разработан также программный комплекс для моделирования и компьютерной диагностики процессов термообработки.

Отличительной особенностью разработанных и использованных в нем моделей является учет объемной геометрии деталей (3D-моделирование), а также фазовых превращений и релаксации напряжений за счет пластических деформаций. Описание распределения температур в нагреваемой или охлаждаемой детали основывается на решении с помощью метода конечных элементов нестационарного уравнения теплопроводности для трехмерного случая с учетом влияния теплового эффекта, наблюдаемого при фазовом превращении, зависимости свойств материалов от температуры и фазового состава. Разработка внедрена в производство на Минском автомобильном заводе.

Разработаны технология и оборудование легирования изделий из металлов с любой геометрической поверхностью в нестационарных режимах плазмы, возбужденной в многокомпонентных газовых средах. Ионно-плазменное азотирование в азотно-водородно-аргоновой плазме при температурах свыше 450°C способствует значительному повышению износостойкости и усталостного сопротивления поверхностных слоев материалов. Управляя составом насыщающего газа, давлением, температурой и временем выдержки, можно получать слои оптимальной структуры и фазового состава. Установлено, что оптимизация свойств упрочняемой поверхности обеспечивается за счет необходимого сочетания нитридного и диффузионного слоев, которые врастают в основной материал. В зависимости от химического состава нитридный слой является либо γ' -фазой (Fe_4N), либо ϵ -фазой (Fe_{2-3}N), ϵ -нитридный слой является коррозионноустойчивым, а γ' -слой — износостойким и относительно пластичным. При этом в зависимости от целей обработки в результате ионно-плазменного азотирования возможно получение как диффузионного слоя с развитой нитридной зоной, обеспечивающей высокую прирабатываемость трущихся поверхностей (применительно для деталей работающих на износ), так и диффузионного слоя без нитридной зоны для режущего и штампового инструмента. Ионно-плазменное азотирование позволяет улучшить такие характеристики изделий, как износостойкость, усталостную выносливость, теплостойкость, коррозионную стойкость и ряд других (М.Н. Босяков, С.В. Бордусов, А.А. Чипурко, А.Н. Козлов, Д.В. Жук).

Подводя итоги, можно констатировать, что сотрудниками кафедры ЭТГ опубликовано более 1500 научных трудов, сделано около 1000 докладов на международных, всесоюзных и республиканских конференциях и семинарах, создано около 500 изобретений, издано 22 монографии, свыше 40 учебников и учебных пособий, более 150 учебно-методических посо-

бий. Научная новизна и практическая ценность различных результатов была высоко оценена на республиканском, союзном и международном уровне:

присуждена Государственная премия Белорусской ССР в области техники за разработку и внедрение комплекса высокоэффективных технологических процессов и оборудования для производства изделий микроэлектроники, 1982 г. Лауреаты премии: А.П. Достанко, В.В. Баранов, М.И. Пикуль, Н.И. Домаренок, М.Х.-М. Тхостов, В.Я. Ширипов и др.;

присуждена Государственная премия Белорусской ССР за цикл учебников и учебных пособий для высших и средних специальных учебных заведений по технологии производства ЭВМ, физико-химическим и технологическим дисциплинам радио- и электронно-вычислительного профиля, 1996 г. Лауреаты премии: А.П. Достанко, А.А. Хмыль, М.И. Пикуль;

присуждена Государственная премия Республики Беларусь в области техники за работу "Порошковые защитные покрытия: теория, технология и практика", 2000 г. Лауреаты премии: С.П. Кундас и др.;

присуждена премия Совета Министров Республики Беларусь за работу "Разработка и внедрение высокоэффективных ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих экономию остродефицитных и драгоценных материалов". Лауреаты премии: Л.П. Ануфриев, А.П. Достанко, А.А. Хмыль, Л.К. Кушнер, И.В. Шут и др.;

присуждена премия Президиума Академии наук СССР за работу по фундаментальным проблемам микроэлектроники "Исследование, разработка и освоение в промышленности высокоэффективных процессов создания токопроводящих систем полупроводниковых интегральных схем", 1980 г. Лауреаты премии: А.П. Достанко, В.В. Баранов., М.И. Пикуль., М.Х.-М. Тхостов, В.Я. Ширипов., В.В. Шаталов и др.;

присуждена премия Ленинского комсомола Беларуси в области науки и техники за цикл работ "Неравновесные процессы в переходных слоях плазма — твердое тело и их влияние на эффективность плазменной обработки, 1990 г. Лауреаты премии: С.В. Бордусов и др.;

присуждена премия Министерства высшего и среднего специального образования СССР за монографию "Плазменная металлизация в вакууме", 1983 г. Лауреаты премии: А.П. Достанко, С.В. Грушецкий, М.И. Пикуль, В.Я. Ширипов и др.

Ряд научно-технических разработок кафедры отмечены золотыми, серебряными и бронзовыми медалями ВДНХ СССР и Республики Беларусь (А.П. Достанко., М.И. Пикуль, С.П. Кундас., М.Н. Лось, М.Х.-М. Тхостов, М.Д. Тявловский), дипломами международных выставок, дипломами и грамотами Министерства образования СССР и РБ, МЭП СССР, НТО РЭС им. А.С. Попова, ВС НТО, ВОИР (БОИР) и др. Награжденные: В.В. Баранов, С.В. Бордусов, М.Н. Босяков., Д.А. Голосов., С.В. Грушецкий, Н.И. Домаренок, А.П. Достанко, С.М. Завадский, В. Ивкин, Д.А. Котов, С.П. Кундас, Л.К. Кушнер, Н.Е. Левчук, С.П. Марышев., М.И. Пикуль, М.Х.-М. Тхостов, М.Д. Тявловский, А.А. Хмыль, А.Е. Хохлов, В.В. Шаталов, Г.М. Шахлевич, В.Я. Ширипов.

Кафедра постоянно разрабатывала и активно внедряла новые методические и организационные формы учебного процесса и научных исследований: филиалы кафедры на производстве, научно-производственные лаборатории двойного подчинения, наставничество и индивидуальная работа со студентами, начиная с первого курса, отраслевая лаборатория, отдел проблемной лаборатории, учебно-научно-производственные объединения, лаборатории вакуумных технологий, созданной совместно с Сианским электронным университетом (КНР), внедрение мультимедийных технологий и др. Следуя традициям ведущих университетов мира и советских вузов, кафедра стремится решать триединую задачу: объединить в базовом структурном подразделении ВУЗа – кафедре – учебный процесс, науку и воспитание. Положительным опытом этого принципа является наиболее успешная деятельность кафедры в период 1992–2002 гг., когда за кафедрой была закреплена наука.

В деятельности кафедры большое внимание постоянно уделяется тесной кооперации с промышленными предприятиями и НИИ электронно-оптического профиля, НАН Беларуси. Одним из результатов этого является участие в учебном процессе и научных исследованиях ведущих ученых и специалистов Беларуси.

Кафедра, руководимая А.П. Достанко, подготовила более 4000 инженеров технологического профиля по новым специальностям "Проектирование и производство радиоэлектронных средств", "Электронно-оптическое аппаратостроение", "Медицинская электроника" в области радиоэлектронной и медицинской техники. Подготовлено 39 докторов наук и кандидатов наук.

Разработанный комплекс принципиально новых технологических процессов изготовления различных изделий микроэлектроники, высокоинформативного и контрольно-диагностического оборудования, недифицитных жидких и газовых технологических сред, широкой гаммы металлургических сплавов и химических соединений для токопроводящих систем, прецизионного вакуумного оборудования на базе ионных и электронных пучков, НЧ-, ВЧ-, СВЧ плазмы и инфракрасного излучения; процессов и оборудования нестационарного электролиза, процессов и установок на базе ультразвуковых колебаний и лазерного излучения, большинство из которых защищены авторскими свидетельствами и патентами многих стран мира, нашли широкое применение в промышленности и научных учреждениях, таких как: ПО "Интеграл", МПО им. В.И.Ленина, НПО "Планар", ПО "Горизонт", г.Минск; ПО "Коралл", г. Гомель; ПО "Электроника", г.Воронеж; ПО "Планета", г.Новгород; завод "Озон", г. Баку, завод "Мезон", г.Кишинев; п/я Р-60П, г.Киев; НИИИТ, г. Калининград Московской обл.; ФТИ им. А.Ф.Иоффе АН СССР, г. Ленинград; завод им. 50-летия СССР, г. Фрязино; опытно-экспериментальный завод, г. Грозный; НПО "Платан", г.Москва; завод "Ритм", г. Речица; ЦКБ "Пеленг", г. Минск; НИИ-40, КНР, ПО "Светлана", г. Санкт-Петербург; ВНИИМЭТ, г. Калуга, НИИ "Волна", г. Саратов и др.

Литература

- Достанко А.П.* Технология интегральных схем: Учеб.пособ. для радиотехн. спец. вузов. Мн.: Выш.шк., 1982. 206 с.
- Плазменная металлизация в вакууме / А.П. Достанко, С.В. Грушецкий, Л.И. Киселевский и др. Мн.: Наука и техника, 1983.
- Благородные металлы. Справ. изд. / Е.М. Савицкий, А.П. Достанко, Н.Б. Горина и др.; Под ред. Е.М. Савицкого. М.: Металлургия, 1984. 592 с. (переиздана в США).
- Модификация поверхности твердых тел в неравновесной газоразрядной плазме / А.П. Достанко, М.Н. Босяков, С.А. Кухарев. Мн.: АРМИТА — Маркетинг, Менеджмент, 1996.
- Автоматизированные обучающие системы и инструментальные средства для их разработки / А.П. Достанко, С.П. Кундас, И.М. Пикуль и др. Мн.: БГУИР, 1997. 120 с.
- Компьютерное моделирование процессов плазменного напыления покрытий / А.П. Достанко, С.П. Кундас, А.Ф. Ильющенко. Мн.: Бестпринт, 1998. 212 с.
- Процессы плазменного нанесения покрытий. Теория и практика / А.П. Достанко, С.П. Кундас, А.Ф. Ильющенко, Е. Lugscheider, U. Egitt и др.; Под ред. акад. НАН Беларуси П.А. Витязя и А.П. Достанко. Мн. АРМИТА — Маркетинг, Менеджмент, 1999. 544 с.
- Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. В 3-х т. / А.П. Достанко, С.В. Бордусов, С.П. Кундас, и др.; Под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко. Мн.: ФУАинформ, 2000.
- Технология и техника прецизионного лазерного модифицирования твердотельных структур / А.П. Достанко, Н.К. Толочко, С.Е. Карпович и др.; Под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко. Мн.: Технопринт, 2002. 375 с.
- Ультразвуковые процессы в производстве изделий электронной техники. В 2-х т. / А.П. Достанко, С.П. Кундас и др.; Под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко. Мн.: Бестпринт, 2002. 401 с.
- Технология производства ЭВМ / А.П. Достанко, М.И. Пикуль, А.А. Хмыль. Мн.: Выш. шк., 1994.
- Технология радиоэлектронных устройств и автоматизация производства / А.П. Достанко, А.А. Хмыль, Л.П. Ануфриев, В.Л. Ланин. Мн.: Выш. шк., 2002. 350 с.
- Медицинская электроника. Дипломное проектирование / А.П. Достанко, В.М. Бондарик, В.А. Бурский, А.Н. Осипов, Н.С. Собчук. Мн.: БГУИР, 2002.
- Технология поверхностного монтажа / А.П. Достанко, С.П. Кундас, Л.П. Ануфриев. Мн.: АРМИТА — Маркетинг, Менеджмент, 2000. 350 с.
- Бордусов С.В.* Плазменные СВЧ технологии в производстве изделий электронной техники / Под общ. ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко. Мн.: Бестпринт, 2002. 214 с.
- Свадковский И.В.* Ионно-плазменные методы формирования тонкопленочных покрытий. Мн.: Бестпринт, 2002. 214 с.

Кундас С.П., Вышинский Н.В., Тявловский М.Д. Ультразвуковое пюощение лент из тугоплавких металлов, применяемых в электронной технике и приборостроении / Под ред. акад. НАН Беларуси А.П. Достанко. Мн.: Бестпринт, 2001. 296 с.

Формирование газотермических покрытий: Теория и практика / А.Ф. Ильющенко, В.А. Оковитый, С.П. Кундас, Б. Форманек; Под ред. А.Ф. Ильющенко. Мн.: Бестпринт, 2002. 480 с.

Кундас С.П., Ланин В.Л., Ануфриев Л.П. Моделирование технологических процессов производства РЭС и ЭВС: Учеб. пособ. по курсам "Технология ЭВС", "Технология РЭС и автоматизация производства". Мн.: БГУИР, 2000. 155 с.

Кундас С.П., Тонконогов Б.А., Кашко Т. А., Гринчик Н.Н. Компьютерное моделирование технологических систем: Учеб. пособ. В 2-х ч. Ч. 2. Мн.: БГУИР, 2003.