

Микроэлектроника как технологический базис интеллектуального приборостроения



Анатолий Белоус,
заместитель
генерального директора
ОАО «ИНТЕГРАЛ» –
управляющая компания
холдинга «ИНТЕГРАЛ»
по научно-техническим
программам
и научной работе,
член-корреспондент

Усиление лидирующей роли микроэлектроники

Благодаря развитию технологий человечество все время продвигается к новым высотам. В условиях четвертой промышленной революции акцент сместился на цифровую автоматизацию заводов с упором на массовое введение интеллектуальных автономных киберфизических систем, которые станут активно использовать огромные массивы данных (так называемые большие данные) и алгоритмы машинного обучения для повышения эффективности. Именно это и требуется для того, чтобы сделать производство более гибким, приспособленным к сегодняшним реалиям и конкурентоспособным в цифровом мире.

Все это стало возможным прежде всего за счет усиления в научно-технической сфере лидирую-

щих позиций микроэлектроники. Сегодня именно она является локомотивом развития различных отраслей, начиная от энергетики, машиностроения, химического и биотехнологического производства, транспортных, банковских систем, авиации и приборостроения, связи и управления, навигации, космических технологий и военной техники и заканчивая умным домом и электронным правительством. Более того, в последнее десятилетие микроэлектроника стала лидером в области конвергенции (взаимного проникновения) научно-технических направлений, являясь технологическим базисом для искусственного интеллекта, нейроморфных вычислений, нейронных сетей, кибероружия и кибербезопасности.

Созданная на основе микроэлектронных технологий функционально насыщенная элементно-компонентная база (ЭКБ) (микросхемы, полупроводниковые приборы, модули, системы на кристалле) является технологической основой всеобщей цифровизации. При этом под цифровой экономикой следует понимать не столько программный продукт, сколько аппаратно-программные комплексы (интеллектуальные приборы, оборудование, изделия, системы и т.д.), то есть законченные умные изделия, применяемые в различных критически важных отраслях и сферах. Именно они обеспечивают независимость в ходе санкционных войн. А самое главное – развитие собственного микроэлектронного производства и выпуска электронных

модулей и систем служит гарантией экономической безопасности и обороноспособности. Особую важность это приобретает в последнее время на фоне экспоненциального роста количества киберугроз. Принятые большинством развитых стран концепции национальной кибербезопасности базируются на использовании во всех критических инфраструктурах исключительно кибербезопасной (в отечественной терминологии – доверенной) ЭКБ [1–3].

Как в Беларуси, так и в России созданы и развиваются многочисленные научные школы и направления, нацеленные на развитие микроэлектронных технологий [4–7]. О значимости белорусской науки в области микроэлектроники и ее многочисленных применений говорит тот факт, что изданные в РФ энциклопедии, монографии, руководства по проектированию интеграловских ученых и инженеров переведены на английский, французский, испанский и другие языки и широко цитируются в работах зарубежных ученых [8–14].

Инновационно-промышленный кластер и его назначение

Для координации усилий ученых белорусских вузов, академических институтов, дизайн-центров и предприятий в нашей стране по инициативе руководства Национальной академии наук в 2017 г. был создан и активно функционирует инновационный промышленный кластер «Микро-, опто-, СВЧ-электроника» (рис. 1).

В его состав вошли ОАО «ИНТЕГРАЛ» и ОАО «Минский НИИ РМ», нацеленные на создание

электронной компонентной базы, а также ОАО «Планар», работающее в области точного электронного машиностроения (технологическое, сборочное и контрольно-измерительное оборудование для производства ЭКБ). Кроме того, в республике имеются и другие государственные и частные организации, задействованные в данной сфере.

Определяющую роль в разработке и выпуске ЭКБ играет холдинг «ИНТЕГРАЛ» – уникальное предприятие микроэлектронной отрасли, реализующее весь комплекс работ, включающий НИОКР, проектирование, производство, маркетинг и сопровождение конечной продукции по широкой номенклатуре изделий и законченных товаров (медицинские приборы, электронные табло, блоки управления бытовой, промышленной, автомобильной и сельскохозяйственной техники и др.).

Сегодня перечень выпускаемой нами продукции насчитывает более 3,5 тыс. типов интегральных микросхем и полупроводниковых приборов, 200 видов жидкокристаллических индикаторов (ЖКИ) и модулей, 150 изделий электронной техники. Все они широко применяются практически во всех отраслях народного хозяйства: вычислительной и энергосберегающей технике, системах управления и информатики, авиационно-космической и атомной промышленности и др. Наши микросхемы и полупроводниковые приборы поставляются в 28 стран мира, однако крупнейшим потребителем выступает Российская Федерация. Примерно пятая часть от импортозамещающей ЭКБ, потребляемой в РФ, производит «ИНТЕГРАЛ».

Создание ЭКБ для систем вооружений, военной и ракетно-космической техники – традиционное

направление деятельности холдинга. За более чем 50 лет работы в данной сфере накоплен значительный опыт проектирования и организации производства высоконадежных интегральных микросхем и дискретных полупроводниковых приборов с повышенной устойчивостью к дестабилизирующим факторам, в том числе к электромагнитным и ионизирующим излучениям.

Стоит отметить, что изделия специального и двойного назначения для российского ОПК составляют значительную часть нашего портфеля продаж.



Рис. 1. Структура микроэлектронного кластера Республики Беларусь

Белорусские микроэлектронные изделия категории качества «ВП» и «ОСМ» прошли испытания на устойчивость к специальным воздействующим факторам в центрах, аттестованных Министерством обороны Российской Федерации, и включены в Перечень электронной компонентной базы, разрешенной для применения при разработке, модернизации, производстве и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники (Перечень ЭКБ 02). Высокий уровень качества ЭКБ подтвержден национальными и международными стандартами, в том числе и ИСО 9001, а также сертификатами Министерства обороны Российской Федерации.

Важное направление деятельности ОАО «ИНТЕГРАЛ» – разработка и производство силовой электроники, прежде всего для машиностроения. Планируется расширять это направление, ориентируясь прежде всего на рынки России, Беларуси, а также стран Юго-Восточной Азии.

Холдинг «Планар» – единственное в Республике Беларусь (а по многим направлениям – и на всем постсоветском пространстве) предприятие по выпуску различного специального технологического оборудования (оптико-механического, сборочного, контрольно-измерительного и др.) для оснащения микроэлектронных и радиоэлектронных производств. Его продукция поставляется в Россию (примерно 70% от производимого оборудования), а также в Германию, Китай, Италию, Республику Корея, Израиль, Тайвань, США.

ОАО «Планар» тесно взаимодействует с ОАО «ИНТЕГРАЛ» и ОАО «Минский НИИ радиоматериалов» по оснащению этих предприятий технологическим и контрольно-измерительным оборудованием при модернизации производственных линий и создании отраслевых лабораторий. Согласованы планы таких поставок на 2022–2025 гг.

Еще один активный участник кластера – ОАО «Минский НИИ радиоматериалов» (МНИИРМ) – задействован в исследованиях и разработке СВЧ-электронной компонентной базы в виде монолитных интегральных схем и оптоэлектронных компонентов на полупроводниках АЗВ5; микроэлектромеханических (МЭМС) датчиков физических и химических характеристик, начиная от чувствительных элементов и заканчивая электронными системами и модулями на их основе; медицинской аппаратуры, датчиков и комплектующих. Основные потребители данной продукции – белорусские и российские предприятия.

В области СВЧ-электроники МНИИРМ занял прочные позиции среди российских потребителей – АО «НПП «Исток» им. Шокина», АО «Светлана-Рост», АО «ОКБ-Планета», АО «НПФ «Микран», АО «НИИПП» и др. Это стало возможным благодаря наличию соответствующей технологической базы и многолетнего опыта разработки и изготовления СВЧ-монолитных интегральных схем, усилителей и других модулей сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн на основе полупроводников АЗВ5. Однако российские потребители размещают в МНИИРМ заказы только на те изделия, которые они не в состоянии изготовить сами или приобрести у своих производителей. На текущий момент МНИИРМ, к сожалению, не входит в перечень поставщиков ЭКБ для военно-промышленного комплекса России.

Второе направление (по МЭМС датчикам) не так развито, как СВЧ-электроника, однако предстоит интенсивная работа в данном направлении, так как соответствующая ниша пока занята и в Беларуси, и в России зарубежными производителями, и у МНИИРМ и «ИНТЕГРАЛ» здесь большие перспективы по импортозамещению.

Концепция развития микроэлектроники

По инициативе НАН Беларуси в 2021 г. был разработан проект концепции развития исследований и разработок в области создания экспортно-ориентированной и импортозамещающей электронной компонентной базы, поддержанный в январе 2022 г. на заседании бюро Президиума. Над документом работала группа ученых под руководством академика Казака Н.С. при активном участии специалистов ОАО «ИНТЕГРАЛ», ОАО «Планар», ОАО «Минский НИИ радиоматериалов», БГУ, БГУИР и БНТУ. Как было отмечено, микроэлектроника – критически важное направление роста экономики нашей страны. Для устойчивого развития современных систем связи, искусственного интеллекта, космических технологий, авто- и тракторостроения, электротранспорта, беспилотных комплексов, сельхозмашиностроения, авиастроения, навигации, банковской системы, приборостроения, военной техники, систем управления необходима собственная совершенная микроэлектронная компонентная база. В проекте концепции представлен аналитический обзор основных мировых направлений микроэлектроники, дан сравнительный анализ национальных программ развития этой

отрасли в Беларуси, России, США, КНР, а также стратегий развития основных производственных предприятий нашей страны в данной области.

Определены основные направления исследований на 2022–2025 гг. в области микро-, опто-, СВЧ-электроники. Среди них – разработка датчиков и микросенсоров для роботизированных систем широкого профиля для применения, нового технологического, сборочного и контрольно-измерительного оборудования для микроэлектроники, новых материалов и технологий для защиты электронных компонентов, радиоэлектронного и информационного оборудования, биологических объектов от внешних энергетических воздействий. В планах – создание инновационных разработок для систем преобразования солнечного излучения в электрическую энергию для гражданского, космического и двойного применения.

В проекте концепции подчеркивается: обеспечить национальную безопасность и независимость Беларуси невозможно без создания и использования в критически важных отраслях доверенной (отечественной) электронной компонентной базы. Согласно документу, «в условиях новых политических реалий, ожесточенной борьбы за обладание рынками, принятия жестких решений в межгосударственных отношениях и установления нового международного порядка с применением санкционных технологий такая отрасль экономики, как микро-, опто- и СВЧ-электроника, должна быть отнесена к критически важному направлению развития экономики Беларуси».

Приоритетные направления развития кластера

В разделах IV–VI Концепции (по каждому предприятию отдельно) определены задачи на 2021–2025 и последующие годы по прикладным исследованиям и созданию новой конкурентоспособной ЭКБ, оптимизации существующих и разработке новых технологий, модернизации и обновлению производственной и научно-экспериментальной базы, разработке нового технологического, сборочного и контрольно-измерительного оборудования для производства ЭКБ, МЭМС и интегрированных систем.

В качестве приоритетных направлений обозначено создание:

- *тепловизионной техники, полупроводниковых фотоприемников УФ-, видимого и ИК-диапазонов спектра, матричных фотоприемников;*
- *энергонезависимых элементов памяти на МОП структурах; интегральной радиофотоники и светоизлучающих систем на кремнии;*
- *новых конструкций, технологий и материалов (в том числе гетероструктуры) на основе GaN для силовой и СВЧ-электроники;*
- *материалов и технологий для защиты электронных компонентов, радиоэлектронного и информационного оборудования, биологических объектов от внешних энергетических воздействий;*
- *датчиков и микросенсоров для роботизированных систем широкого профиля применения;*
- *методов моделирования и расчета, конструкций и программно-аппаратных модулей специализированных систем и инструментов прецизионного технологического оборудования;*
- *нового поколения материалов, структур и электронных компонентов для систем преобразования солнечного излучения в электрическую энергию для гражданского, космического и двойного применения.*

Отраслевая лаборатория холдинга «ИНТЕГРАЛ»

В рамках кластера был активизирован важный вид деятельности, направленный на создание отраслевых лабораторий (организованы и успешно развиваются 10). В ОАО «ИНТЕГРАЛ» в августе 2018 г. появилась отраслевая лаборатория новых технологий и материалов (ОЛНТМ).

Актуальность этого инновационного проекта обусловлена необходимостью создания современного высокотехнологичного производства, способного в сжатые сроки осваивать, опираясь на имеющиеся и перспективные разработки, выпуск конкурентоспособной компонентной базы и изделий электроники, укреплять позиции на имеющихся сегментах мирового рынка и рынка СНГ, а также завоевывать новые сектора этих рынков.

Наиболее перспективными направлениями развития являются:

- *охлаждаемые и неохлаждаемые фотоприемные устройства (тепловизоры, болометры) (рис. 2, 3);*
- *элементы технологии силовых приборов на широкозонных полупроводниках GaN;*
- *новые опциональные расширения уже действующих технологических процессов КМОП, БиКМОП на основе пленочных структур металлов, оксидов, нитридов и сложных керамик.*



Рис. 2. Пример применения фотоприемного устройства

Сегодня ОАО «ИНТЕГРАЛ» – одна из немногих компаний в мире и единственная на территории бывшего СССР, обладающая соответствующими компетенциями и собственными разработками целого семейства мультиплексоров для охлаждаемых и неохлаждаемых фотоприемных устройств. Особенность данного направления – тесная кооперация с изготовителем законченного изделия. Мультиплексор разрабатывается по техническим требованиям конкретного заказчика: под размеры пикселя, матрицы, динамический диапазон видеосигнала и т.д.

Функции ОЛНТМ – проведение научно-исследовательских, поисковых, опытно-конструкторских работ; организация изготовления опытных образцов с последующим расширением промышленной производственной базы при достижении коммерческого успеха. В соответствии с поставленными целями и задачами ОЛНТМ укомплектована современным оборудованием, позволяющим осуществлять исследования и эксперименты, выпускать малые промышленные серии, участвовать в научно-технических программах, программах научных исследований, в инновационных проектах.

Оборудование для лаборатории выбиралось в соответствии с наиболее современными физическими принципами выполнения технологических процессов и операций, с максимально широкими технологическими возможностями и приемлемой длительностью временных процедур по переходу с одного процесса на другой. Оно позволяет работать с кремниевыми пластинами диаметром от 100 до 200 мм

при минимальном времени, необходимом для перехода с одного типоразмера на другой, достигается минимизация затрат на материалы при их большом разнообразии.

Оборудование включает более 30 единиц для выполнения таких сложных технологических процессов, как нанесение пленок со специфическими свойствами, SOL-GEL композиций для фотоприемников, MEMS, памяти и удаление жертвенных слоев полиимида; быстрый термический отжиг до 1500 °С, карбонизация кремния, графитизация SiC, имидизация и сушка жидких композиций, формирование микрорисунка двумя способами (плазмохимическое (ICP-RIE) и жидкостное травление пленок, глубокое травление Si, травление широкозонных полупроводников; взрывная фотолитография (lift-off) для слоев благородных металлов, керамик и других материалов, не поддающихся селективному травлению – фотоприемники, MEMS, металлизация широкозонных полупроводников); высокотемпературную имплантацию и активацию примесей в широкозонных полупроводниках; химическую обработку в органических и неорганических растворах; сборку и герметизацию структур в условиях вакуума.

Сотрудничество отраслевой лаборатории с вузами

Следует подчеркнуть, что создание ОЛНТМ расширяет возможности сотрудничества с высшими учебными заведениями в рамках научно-технической и образовательной деятельности

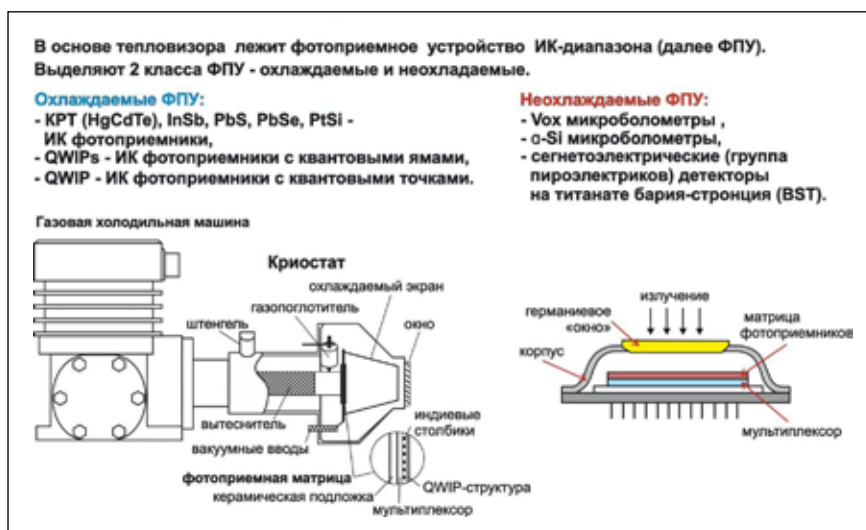


Рис. 3. Классы фотоприемных устройств

ОАО «ИНТЕГРАЛ» с целью подготовки высококвалифицированных кадров. Здесь уместно привести ряд показательных примеров в области фотоники. Как известно, основная цель перехода к фотонике (радиофотонике) – это увеличение полосы пропускания и быстродействия фотонных изделий по сравнению с электронными.

Согласно российской программе развития радиофотоники, планируется выпускать изделия с рабочей частотой 60 ГГц – в 2022 г., 80 ГГц – в 2024 г. и 100 ГГц – после 2025 г. Поэтому выбор материала, механизма излучения и конструкции компонентов радиофотонной схемы (светоизлучающего элемента), по мнению зарубежных экспертов, определяется прежде всего возможностью обеспечения указанных частотных характеристик. С этой точки зрения наиболее подходящим является лавинный механизм, так как временной отклик лавинного эффекта составляет менее 1 пс, что теоретически позволяет создавать светодиоды, работающие во всем гигагерцовом диапазоне частот вплоть до терагерц. Таким образом, отличительная особенность лавинных светодиодов – их высокое быстродействие. Исключительно важным является создание кремниевых лавинных диодов как элемента реально работающей кремниевой фотоники. Ключевые их параметры – эффективность, стабильность и быстродействие светоизлучения, а также минимальный размер светоизлучающего элемента. По этим характеристикам светодиоды, разработанные учеными БГУИР под научным руководством академика Лабунова В.А., соответствуют лучшим мировым аналогам (эффективность и быстродействие), а по отдельным параметрам (стабильность и минимальный размер светоизлучающего элемента) их превосходят.

На основе лавинных кремниевых светодиодов с внутренней модуляцией создана оптопара (выпущена ОАО «ИНТЕГРАЛ»), обеспечивающая как гальваническую развязку, так и быстродействующие оптические межсоединения внутри кремниевых чипов и между ними. Важно то, что технология изготовления кремниевых светодиодов полностью интегрирована с кремниевой технологией КМОП ИС.

Этот проект включен в российскую федеральную программу по радиофотонике, и по данному направлению ведется серьезная работа с Китаем.

Еще один пример эффективного взаимодействия ученых ОАО «ИНТЕГРАЛ» с вузами – совместная работа с отраслевой лабораторией эли-

оники – радиационнотстойкой и космической электроники Института прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко БГУ. Под руководством академика Ф.Ф. Комарова здесь созданы конструкции «излучатель – волновод – фотоприемник» на кремнии и по базовой кремниевой технологии, а на производственной линии ОАО «ИНТЕГРАЛ» изготовлена партия приборных светодиодных структур УФ и видимого диапазонов на основе многослойной композиции SiO₂/SiN_x/SiO₂/Si.

В этой же отраслевой лаборатории разработана и выпущена на ОАО «ИНТЕГРАЛ» и успешно прошла все испытания рабочая партия фотоприемников УФ-, видимого и ближнего ИК-диапазонов (до 3 мкм) на базе гипердопированных атомами теллура слоев кремния на кремнии р-типа. Созданы лабораторные образцы ячеек энергонезависимой, перепрограммируемой, оптически управляемой мемристорной памяти на основе структур SiO₂/SiN_x/Si, прошедшие успешные испытания в ГЦ «Белмикроанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ». Ультрабыстрый доступ к памяти здесь обеспечивается по оптическому каналу, что позволяет существенно повысить производительность вычислительных устройств.

Полученные по этим трем направлениям теоретические и экспериментальные результаты позволили приступить к следующему уровню создания новых классов микроэлектронных устройств. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белоус А.И., Солодуха В.А. Основы кибербезопасности. Стандарты, концепции, методы и средства обеспечения / А.И. Белоус, В.А. Солодуха. – М., 2021.
2. Белоус А.И., Солодуха В.А. Кибероружие и кибербезопасность. О сложных вещах простыми словами // Инфра-Инженерия. 2020.
3. Белоус А.И. Кибербезопасность объектов топливно-энергетического комплекса. Концепции, методы и средства обеспечения // Инфра-Инженерия. 2020.
4. А.И. Белоус, В.А. Солодуха. Современная микроэлектроника: тенденции развития, проблемы и угрозы // Компоненты и технологии. 2018. №10. С. 42–47.
5. Белоус А.И., Солодуха В.А. Основные тенденции развития и проблемы современной микроэлектроники // Живая Электроника России. 2019.
6. А.И. Белоус, В.А. Пилипенко, А.С. Турцевич, С.В. Шведов. Мировые тенденции развития микроэлектроники и место Республики Беларусь в этом процессе // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2012. №4.
7. А.И. Белоус, В.А. Солодуха. Состояние и перспективы развития микроэлектроники в Республике Беларусь // НАНОИНДУСТРИЯ. 2020. Т. 13. №54 (99). С. 38–40.
8. Belous A., Saladukha V., Shvedau S. «Space Microelectronics Volume 1: Modern Spacecraft Classification, Failure, and Electrical Component Requirements», «Space Microelectronics Volume 2: Integrated Circuit Design for Space Applications», London, Artech House, 2017, P. 440, ISBN: 9781630812577, P. 720, ISBN: 9781630812591.

Полный список использованных источников размещен

 <http://innosfera.by/2022/03/microelectronica>