

СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ БЕЛОРУССКОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ НА ПЕРИОД 2022–2025 ГОДОВ



Анатолий Белоус (Anatoly Belous)

Заместитель генерального директора
ОАО «ИНТЕГРАЛ» — управляющая
компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
по научно-техническим программам
и научной работе, член-корр. НАН
Беларуси, д. т. н., профессор,
лауреат Государственной премии РБ,
Заслуженный изобретатель РБ



Николай Казак (Nikolai Kazak)

Генеральный директор
Государственного научно-
производственного объединения
«Оптика, оптоэлектроника и лазерная
техника», академик НАН Беларуси, д. ф.-м.
н., лауреат Государственной премии РБ,
Заслуженный деятель науки РБ

В статье рассмотрено текущее состояние и перспективы развития белорусской микроэлектроники, основные положения Концепции развития на период до 2025 года, состав участников и функции созданного в 2017 году микроэлектронного кластера, назначение, структура и основные результаты деятельности белорусских отраслевых лабораторий, специализирующихся в области микроэлектроники.

ВВЕДЕНИЕ

В январе 2020 года в России была утверждена Стратегия развития электронной промышленности РФ до 2030 года, в которой описан целый комплекс мер перехода от иностранной ЭКБ к отечественной. Во исполнение основных положений этой Стратегии в марте 2021 года была утверждена дорожная карта по формированию и развитию спроса на российскую электронику, то есть по формированию отечественного рынка ЭКБ и радиоэлектронных приборов и систем на ее основе.

Предыдущий опыт реализации инвестиционных проектов по развитию микроэлектронных производств в России показал, что сами по себе ни инвестиции, ни высокотехнологическое оборудование не обеспечивают экономическую эффективность и окупаемость, нужно создавать свой рынок. Поэтому сегодня стратегия Российской Федерации ориентирована на выстраивание внутренних кооперационных цепочек между российскими производителями ЭКБ, радиоэлектронной аппаратуры и конечных изделий, при этом спрос формируется на всех трех уровнях квотированием, госзаказами и иными мероприятиями.

Поскольку сегодня более 90% продукции белорусских микроэлектронных предприятий поставляется потребителям российского рынка, для белорусских предприятий также важны результаты реализации этой дорожной карты, в том числе возможные механизмы встраивания в эти кооперационные цепочки.

Рассмотрим более подробно, насколько это возможно в рамках одной статьи, текущее состояние, проблемы и перспективы развития белорусской микроэлектроники.

БЕЛОРУССКИЙ ИННОВАЦИОННО-ПРОМЫШЛЕННЫЙ КЛАСТЕР И ЕГО НАЗНАЧЕНИЕ

Для координации усилий ученых белорусских вузов, академических институтов, дизайн-центров и промышленных предприятий в Республике Беларусь по инициативе руководства НАН Беларуси в 2017 году был создан и активно функционирует инновационно-промышленный кластер «Микро-, опто-, СВЧ-электроника» (рис. 1).

В состав этого кластера вошли: два базовых предприятия — **ОАО «ИНТЕГРАЛ-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»** и **ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»**, **разрабатывающие и производящие электронную компонентную базу; ОАО «Планар»**, работающее в области точного электронного машиностроения: разработка технологического, сборочного и контрольно-измерительного оборудования для производства ЭКБ. Кроме того, в республике имеются и другие государственные и частные организации, в той или иной мере работающие в сфере микроэлектроники и электронного производства.

Определяющую роль в разработке и производстве ЭКБ в Республике Беларусь играет холдинг «ИНТЕГРАЛ» — уникальное на территории СНГ предприятие микроэлектронной отрасли, реализующее весь комплекс работ, включающий НИОКР, проектирование, производство, маркетинг и сопровождение конечной продукции у потребителя по широкой номенклатуре микроэлектронных изделий и законченных товаров (медицинские приборы, электронные табло, блоки управления бытовой, промышленной, автомобильной и сельскохозяйственной техникой и т.д.).

Сегодня номенклатура выпускаемой холдингом «ИНТЕГРАЛ» продукции насчитывает более 3,5 тысяч типов интегральных микросхем и полупроводниковых приборов, 200 типов

усилителей и других модулей сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн на основе полупроводников АЗ В5. Однако российские потребители размещают в МНИИРМ заказы только на те изделия, которые они не в состоянии изготовить сами или приобрести у российских производителей. На текущий момент МНИИРМ, к сожалению, не входит в Перечень поставщиков ЭКБ для военно-промышленного комплекса России и над этим еще надо работать.

Хотя второе направление (по МЭМС-датчикам) не так развито, как СВЧ-электроника, однако работы здесь планируется проводить весьма интенсивно, поскольку эта ниша пока занята в Беларуси и в России зарубежными производителями, а у МНИИРМ, как и у ОАО «ИНТЕГРАЛ», здесь большие перспективы по импортозамещению.

КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

В период 2012–2015 годов по инициативе ОАО «ИНТЕГРАЛ» команда экспертов из вузов, институтов НАН Беларуси, промышленных предприятий ведомственной подчиненности Министерства промышленности РБ и Государственного военно-промышленного комитета РБ разрабатывала проект государственной программы «Развитие микроэлектроники в Республике Беларусь на 2015–2020 годы и на период до 2025 года».

По аналогии с российскими федеральными программами особенностью разработанного проекта белорусской государственной программы было сочетание двух взаимодополняющих составляющих программы: *инновационной* (научно-технической), предусматривающей разработку новых изделий и технологий микроэлектроники, специального технологического оборудования, и *инвестиционной* (капиталовложения), предусматривающей модернизацию существующих и создание новых производств.

Проект Национальной программы носил комплексный характер и включал более ста мероприятий по шести взаимосвязанным направлениям:

- поисковые исследования и формирование научного задела;
- разработка технологических процессов и средств проектирования;
- создание специального технологического оборудования;
- разработка широкого спектра изделий микроэлектроники;
- модернизация (переоснащение) действующих производств и создание новых;
- развитие производственной и аналитической базы.

В выполнении мероприятий программы планировалось задействовать не только ресурсы предприятий Министерства промышленности РБ, но и весь научно-технический потенциал РБ в области микроэлектроники.

Однако в итоге в силу ряда причин материалы этой Государственной программы не были представлены для утверждения в Правительство Республики Беларусь.

Поэтому за последнее десятилетие НИОКР микроэлектронной тематики в Республике Беларусь выполнялись в рамках заданий ряда республиканских научно-технических программ: «Белэлектроника», «Микроэлектроника», «Средства приема, передачи и отображения информации», «Медицинская техника», «Радиоэлектроника»; а также Государственных комплексных программ научных исследований (ГКПНИ) «Электроника», «Нанотех», «Инфотех», «Космические исследования»; «Электроника и фотоника».

В 2021 году по указанию Председателя Президиума НАН Беларуси академика В. Г. Гусакова был разработан проект **Концепции развития в Беларуси исследований и разработок в области**

создания экспортноориентированной и импортозамещающей электронной компонентной базы, который был рассмотрен и поддержан в январе 2022 года на заседании бюро Президиума Национальной академии наук. Фактически этот документ содержит основные контуры будущей Государственной программы развития микроэлектроники в Республике Беларусь.

Документ разработан группой ученых НАН Беларуси под руководством академика Н. С. Казака при активном участии специалистов ОАО «ИНТЕГРАЛ», ОАО «Планар», ОАО «Минский НИИ радиоматериалов», БГУ, БГУИР и БНТУ. Как было отмечено в принятом постановлении Бюро Президиума, микроэлектроника — критически важное направление развития экономики страны и служит основой большинства современных технологий. Для устойчивого развития в стране современных систем связи, искусственного интеллекта, космических технологий, авто- и тракторостроения, электро-транспорта, беспилотных комплексов, сельхозмашиностроения, авиастроения, навигации, банковской системы, приборостроения, военной техники, систем управления необходима собственная надежная микроэлектронная компонентная база.

В проекте концепции определены основные направления исследований и разработок на 2022–2025 годы в области микро-, опто-, СВЧ-электроники. Среди них — разработка датчиков и микросенсоров для роботизированных систем широкого профиля 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. Также в планах создать новое поколение материалов, структур и электронных компонентов для систем преобразования солнечного излучения в электрическую энергию для гражданского, космического и двойного применения.

В проекте концепции подчеркивается, что обеспечить национальную безопасность и независимость Беларуси невозможно без создания и использования в критически важных отраслях доверенной (отечественной) электронной компонентной базы, что **«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».**

В проекте концепции предлагаются конкретные меры для развития отечественной твердотельной микро-, опто- и СВЧ-электроники и электронного машиностроения, обеспечения необходимой импортонезависимости микроэлектроники и радиоэлектронной продукции.

Отдельный раздел концепции посвящен путям решения проблемы импортозамещения материалов, используемых сегодня в базовых технологических процессах изготовления микросхем в серийном производстве.

Отмечено, что имеет место критическая зависимость от иностранных поставщиков пластин, химикатов, газов, реактивов, специального технологического оборудования (комплектующих и расходных материалов), САПР. Любые ограничения по ним могут дополнительно снизить уровень самообеспечения изделиями микроэлектроники.

Поэтому поставлена задача разработать в сжатые сроки силами белорусских академических институтов и промышленных предприятий совместно с российскими партнерами соответствующих импортозамещающих технологий.

ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КЛАСТЕРА

В Концепции по каждому предприятию отдельно более подробно рассмотрены конкретные задачи, которые ставят на 2021–2025 и последующие годы эти предприятия по проведению прикладных исследований и созданию новой конкурентоспособной ЭКБ, оптимизации существующих и созданию 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. Приведены соответствующие обоснования.

В качестве приоритетных направлений работ участниками кластера были определены:

- тепловизионная техника, полупроводниковые фотоприемники УФ, видимого и ИК-диапазонов спектра, матричные фотоприемники;
- энергонезависимые элементы памяти на МОР-структурах;
- интегральная радиофотоника и светоизлучающие системы на кремнии;
- новые конструкции, технологии и материалы (в том числе гетероструктуры) на основе GaN для силовой и СВЧ-электроники;
- новые материалы и технологии для защиты электронных компонентов, радиоэлектронного и информационного оборудования, биологических объектов от внешних энергетических воздействий;
- датчики и микросенсоры для роботизированных систем широкого профиля применения;
- методы моделирования и расчета, конструкций и программно-аппаратных модулей специализированных систем и инструментов прецизионного технологического оборудования;
- новое поколение материалов, структур и электронных компонентов для систем преобразования солнечного излучения в электрическую энергию для гражданского, космического и двойного применения.

Еще один важный вид деятельности был активизирован в рамках кластера — это создание отраслевых лабораторий.

ОТРАСЛЕВЫЕ ЛАБОРАТОРИИ БЕЛАРУСИ

Развитие наукоемких и высокотехнологичных производств, ускорение внедрения инновационных, научно-технических разработок в серийное производство и информатизация экономики в целом требуют новых высокоэффективных форм кооперации науки, производства и образования.

Одной из форм такого взаимодействия является создание и функционирование отраслевых лабораторий.

В целях стимулирования создания отраслевых лабораторий Указом Президента Республики Беларусь от 7 августа 2012 года № 357 установлено соответствующее направление использования средств инновационных фондов. Основными направлениями деятельности отраслевых лабораторий являются выполнение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических работ, научное сопровождение инновационных проектов, опытно-промышленная апробация и внедрение в производство результатов научной и научно-технической деятельности в организациях профильной сферы Национальной академии наук Беларуси.

По состоянию на февраль 2022 года в Республике Беларусь создано и функционирует более 90 отраслевых лабораторий, из них: в системе Министерства образования — 33, Национальной академии наук Беларуси — 24, Министерства промышленности — 13. Перечислим ниже отраслевые лаборатории, которые задействованы в реализации положений концепции развития белорусской микроэлектроники:

- Отраслевая лаборатория молекулярно-пучковой эпитаксии нитридных гетероструктур (ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»);

- Отраслевая лаборатория испытаний лазерной и оптоэлектронной техники (ГНУ «Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси»);
- Отраслевая лаборатория оптоэлектронных и волоконно-оптических технологий для создания диагностических и измерительных систем (ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»);
- Отраслевая лаборатория радиационных воздействий (ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению»);
- Отраслевая лаборатория проектирования и разработки фотошаблонов для обеспечения производства изделий микро-, опто- и СВЧ-электроники и МЭМС-технологий (ОАО «Минский НИИ радиоматериалов»);
- Отраслевая лаборатория информационно-коммуникационных систем (НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» БГУ);
- Отраслевая лаборатория испытаний и нанодиагностики спецтехнологического оборудования ОАО «ПЛАНАР» (ОАО «Планар»);
- Отраслевая лаборатория перспективных информационно-коммуникационных технологий (УО «Белорусская государственная академия связи»).

Обладание современным технологическим и научным оборудованием является залогом успешного производства и обеспечивает высокую конкурентоспособность продукции как на внутреннем, так и на международном рынках. Кроме того, развитие отраслевых лабораторий путем их оснащения современным научным оборудованием привлекает молодых специалистов к научно-исследовательской работе за счет больших возможностей реализации их творческого потенциала.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОТРАСЛЕВОЙ ЛАБОРАТОРИИ ХОЛДИНГА «ИНТЕГРАЛ»

На базе ОАО «ИНТЕГРАЛ» (управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ») в августе 2018 года была создана отраслевая лаборатория новых технологий и материалов (ОЛНТМ).

Актуальность этого инновационного проекта была обусловлена необходимостью создания современного высокотехнологичного производства, способного в сжатые сроки осваивать, опираясь на имеющиеся и перспективные разработки ОАО «ИНТЕГРАЛ», производство конкурентоспособной электронной компонентной базы и изделий электроники, укрепление позиций на имеющихся сегментах мирового рынка и рынка СНГ, а также завоевание новых секторов этих рынков.

Здесь наиболее перспективными направлениями развития являются:

- охлаждаемые и неохлаждаемые фотоприемные устройства (тепловизоры, болометры);
- разработка элементов технологии силовых приборов на широкозонных полупроводниках GaN;
- создание новых опциональных расширений уже действующих технологических процессов КМОП, БиКМОП на основе пленочных структур металлов, оксидов, нитридов и сложных керамик.

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

Функциями ОЛНТМ являются: проведение научно-исследовательских и поисковых работ (НИР); опытно-конструкторских работ (ОКР); 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, дающим возможность проведения исследовательских, экспериментальных работ и выпуска малых промышленных серий, участия в выполнении научно-технических программ, программ научных исследований, в инновационных проектах.

Следует подчеркнуть, что создание ОЛНТМ расширяет возможности сотрудничества с вузами в рамках научно-технической и образовательной деятельности ОАО «ИНТЕГРАЛ» с целью научно-технического развития и подготовки высококвалифицированных кадров.

Здесь уместно привести ряд примеров. Как известно, основная цель перехода к фотонике (радиофотонике) — это увеличение полосы пропускания и быстродействия фотонных изделий по сравнению с электронными. Поэтому выбор материала, механизма излучения и конструкции компонентов радиофотонной схемы (светоизлучающего элемента) 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 гигагерцевом диапазоне частот вплоть до терагерц. Таким образом, отличительной особенностью лавинных светодиодов является их высокое быстродействие. Ключевыми параметрами лавинных светодиодов являются эффективность, стабильность и быстродействие светоизлучения, а также минимальный размер светоизлучающего элемента. По этим параметрам лавинные светодиоды, разработанные учеными БГУИР под научным руководством академика В. А. Лабунова., соответствуют лучшим мировым аналогам (эффективность и быстродействие), а по отдельным параметрам (стабильность и минимальный размер светоизлучающего элемента) лавинные светодиоды, разработанные учеными БГУИР, превосходят мировые аналоги [1–3].

На основе лавинных кремниевых светодиодов с внутренней модуляцией создана оптопара (произведенная на ОАО «ИНТЕГРАЛ»), обеспечивающая как гальваническую развязку, так и быстродействующие оптические межсоединения внутри кремниевых чипов и между ними. Технология кремниевых светодиодов интегрирована с кремниевой технологией КМОП ИС.

Этот совместный проект включен в российскую программу по радиофотонике, серьезный интерес к полученным результатам проявили китайские предприятия.

Еще один пример эффективного взаимодействия ученых ОАО «ИНТЕГРАЛ» с вузами — совместная работа с отраслевой лабораторией элионики — радиационно стойкой и космической электроники НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко» БГУ. Под руководством академика Ф. Ф. Комарова здесь выполнены разработки по созданию конструкции «излучатель-волновод-фотоприемник» на кремнии и по базовой кремниевой технологии, а на производственной линии ОАО «ИНТЕГРАЛ» была изготовлена партия приборных светодиодных структур УФ и видимого диапазонов на основе многослойной композиции $\text{SiO}_2/\text{SiNx}/\text{SiO}_2/\text{Si}$.

Этой же отраслевой лабораторией также разработана, изготовлена в холдинге «ИНТЕГРАЛ» и успешно прошла все испытания рабочая партия фотоприемников УФ-, видимого и ближнего ИК (до 3 мкм)

диапазонов на базе гипердопированных атомами теллура слоев «кремния на кремнии» *p*-типа.

Также разработаны и изготовлены лабораторные образцы ячеек энергонезависимой, перепрограммируемой, оптически управляемой мемристорной памяти на основе структур $\text{SiO}_2/\text{SiNx}/\text{Si}$, прошедшие успешные испытания в ГЦ «Белмикроанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ». Ультравысокий доступ к памяти здесь обеспечивается по оптическому каналу, что позволит существенно повысить производительность вычислительных устройств.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие собственного микроэлектронного производства является ключевым элементом технологической независимости и конкурентоспособности национальной промышленности и играет важную роль в обеспечении обороноспособности и национальной безопасности любого современного государства.

Решение актуальных проблем развития отечественных современных микроэлектронных технологий на фоне происходящих в мире процессов глобализации полупроводниковой индустрии потребовало консолидации научно-технического потенциала ведущих научных организаций, вузов и промышленных предприятий Республики Беларусь в форме создания координирующей структуры — микроэлектронного кластера.

Учеными и специалистами вузов, предприятий и организаций, входящих в Кластер, в 2021 году был разработан программный документ — проект Концепции развития в Беларуси исследований и разработок в области создания экспортоориентированной и импортозамещающей электронной компонентной базы, определяющей основные направления исследований и разработок в области микро-, опто-, СВЧ-электроники на период 2022–2025 годов.

Резкое обострение внешнеполитической ситуации, санкционный подход в области высоких технологий, существенная зависимость от поставок импортных материалов для микроэлектроники несут в себе существенные угрозы для отрасли, поэтому для успешного решения задачи развития отечественной микроэлектроники требуется объединение усилий российских и белорусских предприятий, вузов и академических институтов.

В 2021 году был подписан ряд российско-белорусских документов по активизации сотрудничества, в том числе проект «Соглашения между Правительством Республики Беларусь и Правительством Российской Федерации о сотрудничестве в области развития микроэлектронных технологий, проектирования и производства электронной компонентной базы и электронного машиностроения». Ожидается, что его утверждение придаст дополнительный импульс развитию российско-белорусского сотрудничества в области микроэлектроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lazarouk S., Leshok A., Labunov V., Borisenko V. Efficiency of avalanche light-emitting diodes based on porous silicon//Semiconductors. 2005. No. 39.
2. Lazarouk S., Leshok A., Kozlova T., Dolbik A., Le Dinh V., Ilkov V., Labunov V. 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections through Optical Interposer//International Journal of Nanoscience. 2019. No. 18.
3. Lazarouk S., Sasinovich D., Katsuba P., Labunov V., Leshok A., Borisenko V. Electroluminescence from nanostructured silicon embedded in anodic alumina//Semiconductors. 2007. No. 41.