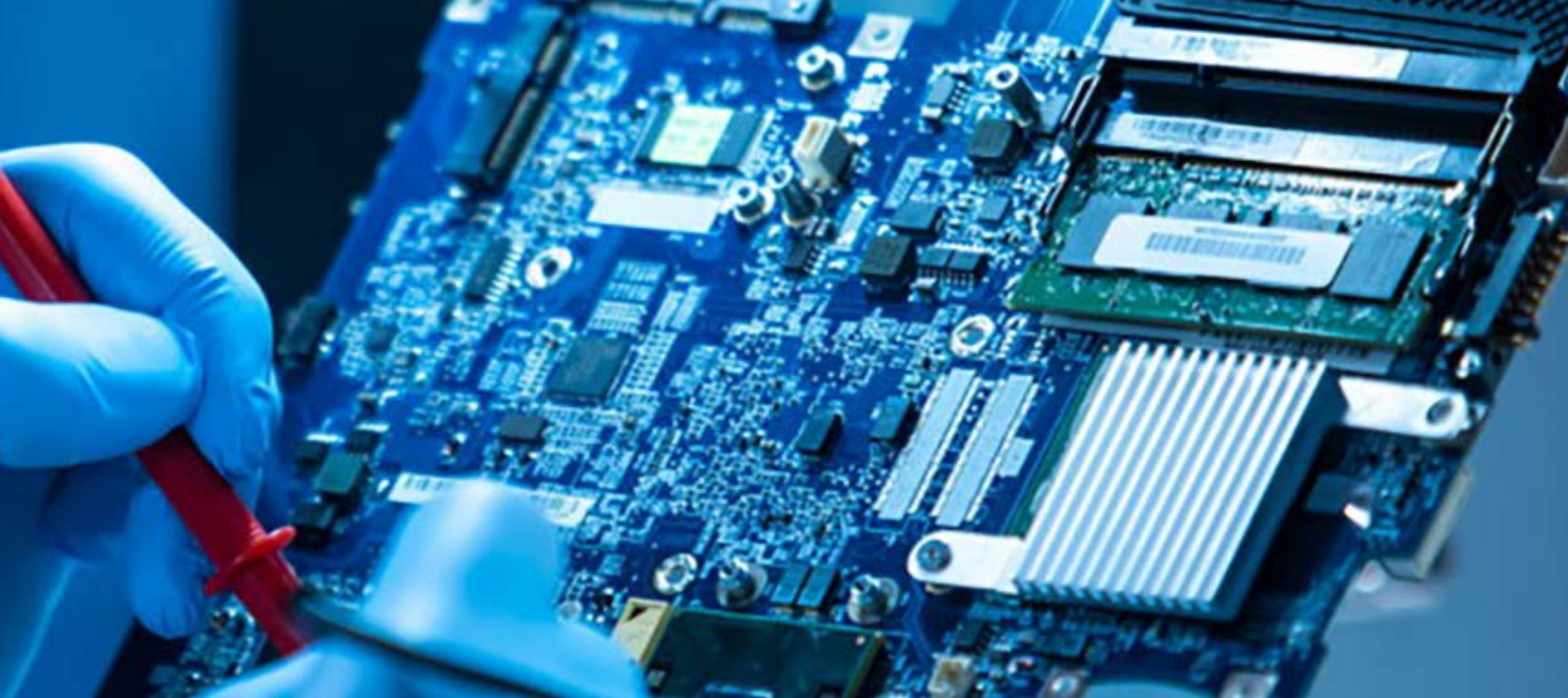




Инновационно-промышленный кластер «Микро-, опто- и СВЧ-электроника» – добровольная координирующая структура, осуществляющая свою деятельность в сфере научных исследований, опытно-конструкторских разработок и выпуска передовых изделий микроэлектроники, был создан в нашей стране в феврале 2017 г. В его состав вошли известные профильные предприятия – ОАО «Интеграл», «Планар», Минский НИИ радиоматериалов, научные организации НАН Беларуси и ведущие национальные университеты. Одним из инициаторов объединения лучших сил страны, специализирующихся на электронной компонентной базе, в единый научно-промышленный конгломерат был академик Николай КАЗАК. Мы расспросили у него, каких успехов удалось добиться в этом стратегически важном направлении и какой вклад в его развитие вносят белорусские ученые.

# Вендор белорусской электроники



**– Николай Станиславович, предположу, что для выработки стратегии деятельности кластера были предприняты серьезные организационные и правовые усилия. Какие наиболее важные из них стоит отметить?**

– В первую очередь следовало определить новую перспективную тематику фундаментальных и прикладных работ. Для этого были образованы рабочие группы по заданной тематике, налажено тесное взаимодействие специалистов заинтересованных предприятий, обладающих соответствующим опытом и компетенциями, утвержден Перспективный план сотрудничества Национальной академии наук Беларуси, вузов, ОАО «Интеграл» и ОАО «Планар» на 2017–2020 гг., а затем и на 2021–2025 гг., предусматривающий реализацию нескольких десятков мероприятий. Огромный, не побоюсь этого слова, вклад в формирование перспективных точек роста внесла разработанная с участием кластера Концепция развития в Республике Беларусь исследований и разработок для создания электронной компонентной базы на 2021–2025 гг. В документе содержится обзор мировых тенденций в отрасли, а также поставлены конкретные задачи по диверсификации номенклатуры выпускаемых в нашей стране изделий микро-, опто- и СВЧ-электроники, МЭМС-датчиков и сенсоров. Концепция получила одобрение Министерства промышленности, Государственного комитета по науке и технологиям, Министерства образования и Министерства экономики.

В 2022–2023 гг. по данному вопросу было организовано несколько совещаний у Главы государства, на которых дан ряд серьезных поручений. Во исполнение одного из них Министерством промышленности совместно с Национальной академией наук разработана и утверждена Программой развития микроэлектронной промышленности Республики Беларусь на период до 2030 г. Она содержит 146 заданий по совершенствованию и модернизации действующих в Республике Беларусь микроэлектронных производств и предусматривает использование новых материалов, технологий, конструктивных и технологических решений, новейших достижений науки, а также реализацию важнейших инновационных проектов. Для решения поставленных задач созданы отраслевые лаборатории для быстрого освоения в производстве опытных образцов и небольших партий новых изделий микроэлектроники. На сегодняшний день функционирует уже 10 таких структур.

**– Основным звеном кластера являются три промышленных предприятия – ОАО «Интеграл», «Планар» и Минский НИИ радиоматериалов. Какова номенклатура электронных компонентов, выпускаемых ими?**

– Безусловно, это наши «киты», на которых держится отрасль и которые демонстрируют весьма высокие результаты. Так, «Интеграл» – ведущий белорусский микроэлектронный холдинг,



обеспечивающий полный цикл изготовления продукции – от этапа проектирования до серийного выпуска, с 2013 по 2022 г. реализовал 4 инвестиционных проекта. Они касались развития производства эпитаксиальных структур, создания прецизионной сборки, разработки перспективных технологий корпусирования микросхем и внедрения процессов усовершенствованной биполярной и БиКДМОП-технологии на пластинах диаметром 150 мм. В результате возможности предприятия существенно расширились, и номенклатура изделий стала насчитывать более 3500 типов микросхем и полупроводниковых приборов, сборочные мощности по корпусированию дискретных приборов – 30 млн штук в год, микросхем – 60 млн. В обозримой перспективе здесь планируется освоение новых технологических процессов с проектными нормами до 250 нм. По прогнозам, объем выручки от реализации продукции к 2030 г. вырастет почти вдвое по сравнению с прошлым годом. Здесь создана и успешно функционирует современная отраслевая лаборатория новых технологий и материалов (ОЛНТМ).

Минский НИИ радиоматериалов специализируется на проектировании и изготовлении СВЧ монолитных интегральных схем и микроэлектромеханических чувствительных элементов. Освоенные проектные нормы 100–200 нм в полной мере соответствуют мировому уровню для такого рода продукции. Ее перечень увеличился за последние годы в десятки раз и включает более 120 позиций СВЧ-компонентов, МЭМС-датчиков, электронных модулей, систем и другой техники. Созданы оригинальные и импортозамещающие СВЧ монолитные интегральные схемы сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн, всего 58 наименований, производственные мощности – до 300 тыс. в год. СВЧ-компоненты поставляются для белорусских и российских предприятий: ОАО «Алевкурп», ОКБ ТСП, АО «НПП «Исток» им. Шокина», АО «ИЭМЗ «Купол», ООО «КОМЕТА», ООО «ВебСейлЭлектроникс», АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», АО «ЭРКОН», ФГУП РНИИРС, ООО «НПК Позитрон» и др.

МНИИРМ обладает технологиями изготовления микроэлектромеханических систем, в частности чувствительных элементов датчиков – акселерометров, инклинометров, гироскопов. В интересах отечественных предприятий разработан и выпускается широкий спектр импортозамещающих изделий: датчиков и блоков контроля, бесконтактных индуктивных выключателей и т.д., для ПАО «КАМАЗ» – образец системы контроля перегруза автомобиля.

В институте организованы 2 отраслевые лаборатории: по проектированию и изготовлению фотосаблонов для выпуска микро-, опто- и СВЧ-электроники и МЭМС-технологий, а также по созданию критических технологий МЭМС и СВЧ электронных компонентов. В ближайшие годы в модернизацию предприятия планируется вложить около 14 млн долл. Все эти шаги позволяют МНИИРМ уверенно наращивать производство продукции, работ, услуг. Так, рост их объема за 1-й квартал 2023 г. по отношению к аналогичному периоду 2022 г. составил 181,6%, экспорта – 334,6%.

Научно-производственный холдинг «Планар» известен сложнейшим оптико-механическим, технологическим, сборочным и контрольно-измерительным оборудованием для микроэлектроники. Их перечень обширен и требует отдельной публикации. Поэтому остановлюсь только на том, что согласно Программе «Развитие микроэлектронной промышленности Республики Беларусь на период до 2030 г.» предприятию предстоит освоить производство изделий с проектными нормами 90–65 нм, а по отдельным видам машин – 45–28 нм.

*– Микроэлектроника, являясь элементом V технологического уклада, служит основой для большинства современных технологий следующего, VI уклада: искусственного интеллекта, современных систем связи, космических технологий, электротранспорта, беспилотных комплексов, авиационного, навигации, банковской системы, систем управления и др. Что было принято для диверсификации выпускаемых белорусскими предприятиями изделий микро-, опто- и СВЧ-электроники?*

– Осознавая необходимость выработки инновационных подходов для производства изделий микроэлектроники на передовом, соответствующем мировому уровню, участниками кластера коллективно были определены основные направления исследований и разработок на текущую пятилетку с использованием новейших достижений в области материаловедения, микро- и наноструктур, микро-, нано-, лазерной, волоконной и квантовой оптики. К примеру, в ОАО «Интеграл» и ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» была выполнена опытно-конструкторская работа и начат выпуск лавинных кремниевых фотодиодов, характеристики которых не уступают аналогичным фотоприемникам мирового лидера – японской фирмы «Hamamatsu», а по некоторым параметрами превышают их. Изделия уже поставляются организациям

Республики Беларусь и Российской Федерации, имеются запросы из Китая и Индии. Новым витком развития стал малогабаритный кремниевый многопиксельный фотоумножитель, разработаны его опытные образцы, ведется подготовка к серийному выпуску. В рамках выполнения задания Союзной НТП «Компонент-Ф» планируется расширить номенклатуру фотоприемников. Они будут обладать высокими показателями: диапазоном спектральной чувствительности 0,35–1,06 мкм, коэффициентом усиления 105–106, пробивным напряжением 27–60 В, возможностью работы как в пропорциональном, так и в гейгеровском режиме.

Проводится НИОКР по расширению семейства датчиков на основе кремниевых лавинных диодов и фотоумножителей: гамма- и бета-излучения, регистрации ультрафиолетового излучения малой интенсивности. Не могу не упомянуть и о достижениях в области тепловизионных технологий. ОАО «Интеграл», ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» и БГУ трудятся над их созданием. В частности, разрабатываются микроболлометрические фоточувствительные матрицы с использованием диоксида ванадия и комплементарные структуры на кремнии, охлаждаемые фоточувствительные матрицы и тепловизионные системы на основе неохлаждаемых микрорезонаторов Фабри – Перо. Кроме того, отрабатываются технологии гибридизации мультиплексоров с неохлаждаемыми и охлаждаемыми фотоприемными матрицами, изготовлен тепловизор с охлаждением с чувствительностью 0,04 оК.

В соответствии с мировыми трендами по постепенной замене кремниевых транзисторов на нитрид галлиевые в Институте физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси активно ведутся изыскания в области создания нового поколения СВЧ-электроники на базе этого соединения, позволяющего без существенных изменений производственных цепочек и технологических норм осуществить технологический скачок в быстродействии – до 100 раз, мощности – до 4 раз, температурной – до 400–600 °С и радиационной стойкости – в 10–100 раз. Эти прорывные показатели способны дать новую жизнь зарядным устройствам, системам питания и управления электромобилями, космической электронике и электронике специального назначения и т.д. В Институте получены гетероструктуры AlGaIn/GaN с характеристиками двумерного электронного газа на уровне лучших мировых результатов. На их основе разработаны тестовые СВЧ-транзисторы с частотой отсечки 16 ГГц, крутизной 160 мСм/мм и максимальным током стока более 1,1 А/мм, что является

отличным результатом для ширины затвора 1 мм. Большие подвижки есть в проектировании дизайна гетероструктур, топологии СВЧ- и силовых транзисторов. Последние имеют на два порядка большую частоту работы – до 10 МГц, высокий КПД, в 4 раза сниженные тепловые потери и значительно меньшие массогабаритные параметры. Такие транзисторы найдут применение в активных фазированных антенных решетках радаров, системах телекоммуникации мобильного и авиакосмического базирования, а также 5G и 6G сотовой связи.

**– Во многих государствах мира микросхемотехника и технологии защиты изделий электроники входят в Перечень критических разработок. Какое значение придается этому направлению в нашей стране?**

– В Беларуси принято решение о более интенсивном его развитии. К тому же для этого не требуются дорогостоящие технологии глубокого субмикрона. Например, в арсенале Минского НИИ радиоматериалов – широкий спектр различных датчиков, которые поставляются белорусским и российским организациям. Это датчики деформации, конечного положения, угла наклона, теплового потока (0,1–14 мкм), системы мониторинга угарного, углекислого газа и метана в критических точках автомобиля, дифференциальный зонд для контроля дефектности круглого стального проката, кремниевые сопла и др. Для расширения работ в этой области в МНИИРМ созданы, как я уже упоминал, две новые отраслевые лаборатории. К этой тематике активно подключается и ОАО «Интеграл». Фундаментальные и прикладные исследования обеспечиваются НАН Беларуси, БГУИР, БНТУ и БГУ. В перспективе основные усилия будут сосредоточены на разработке технологий для сборки 2D и 3D для многофункциональных микроэлектромеханических систем; изготовлении чувствительных элементов; оптических и магнитоэлектрических сенсоров постоянного и переменного магнитного и электрических полей на основе пленочных гетероструктур мультиферроиков; пленочных газовых сенсоров высокого быстродействия на графеновых структурах и оксидных материалах и др.

В НПЦ НАН Беларуси по материаловедению разработаны технологии формирования многослойных пленочных экранов (МПЭ) симметричного и градиентного типов, составных и широкополосных электромагнитных экранов для защиты от воздействия постоянного магнитного и электромагнитного поля низкой частоты. Высокие результаты получены на МПЭ симметричного типа. Совместно с российским

предприятием «ТЕМП-АВИА» были изготовлены и проведены испытания чувствительных сенсоров навигационной аппаратуры ракетной техники на устойчивость к случайной вибрации, которая в присутствии излучения приводит к появлению электрического потенциала на электронных компонентах. Экранирование существенно улучшило характеристики датчиков угловых скоростей в режимах старта, взлета и ускорения летательных аппаратов. МПЭ градиентного типа тоже зарекомендовали себя мощными средствами защиты. Если эффективность в отношении импульсного электромагнитного поля напряженностью  $1,25 \div 3,5$  кА/м для микросекундного диапазона, обеспечиваемая конструкциями бортовых кабельных сетей из алюминия, составила минус 29 дБ (29 раз), то с применением МПЭ – минус  $60 \div 51$  дБ ( $1000 \div 360$  раз).

В ВЧ- и СВЧ-диапазонах электромагнитного воздействия используются материалы, поглощающие и отражающие его, а также сильные поглотители. Образцы последних на основе полимерных матриц с добавлением многослойных углеродных нанотрубок созданы в НИИ ПФП БГУ. Благодаря им в диапазоне частот 14–60 ГГц излучение ослабевает до минус 40 – минус 45 дБ.

В ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси и БГУИР разрабатывают тонкопленочные, фольговые и композиционные составы на основе оксидов алюминия и переходных металлов, наночастиц углерода и других углеродных наноматериалов. В НПЦ НАН Беларуси по материаловедению совместно с АО «ТЕСТ-ПРИБОР», г. Москва, и ОАО «Интеграл» ведутся работы в области локальной радиационной защиты на основе композиционных и многослойных материалов, созданию на их базе специализированных корпусов и модулей. Как показывает практика, они способны ослабить поток электронов с энергией 1,8 MeV с почти в 100 раз.

**– Известно, что законы развития микроэлектроники – Мура, Деннарда, Амдала – демонстрируют симптомы насыщения. Каким видится выход из данной ситуации?**

– В вышедшей в 2022 г. в России книге наших белорусских ученых А.И. Белоуса и В.А. Солодухи «Материалы и устройства наноэлектроники. Электроника после Мура» сделана успешная попытка дать развернутый ответ на этот вопрос. На основании системного анализа мировых тенденций здесь показано, что наиболее перспективными направлениями дальнейшего развития микроэлектроники

является квантовая микроэлектроника, спинтроника, магнетроника, стрейтроника, квантовые точки, нейроморфные наноматериалы и новые вычислительные системы на их основе. Одним из вариантов может стать объединение электроники с такой совместимой технологией, как фотоника. Оптическая передача информации обеспечивает не только гальваническую развязку, но и высокую скорость передачи данных до 50–100 Гбит/с, в то время как предел используемой в настоящее время медной металлизации оценивается в  $\sim 20$  Гбит/с. Однако здесь есть ряд серийных проблем, связанных с применением оптических межсоединений. Одна из них – разработка технологий и конструкций оптических компонентов минимального размера – не более 45 нм. Они, кроме больших размеров, характеризуются низкой температурной стойкостью. Фундаментальной проблемой для фотонных интегральных схем является создание проводников и волноводов с низкими потерями. При этом наиболее предпочтительна кремниевая фотоника. Она идеальна благодаря высокой развитости и экономичности КМОП-технологии производства кремниевых интегральных схем, с которой она совместима. Кремний обладает важными оптическими свойствами в ближней инфракрасной области. Он работает на длине волны 1,55 мкм, поэтому модуляторы, волноводы и фотоприемники также могут быть созданы на базе этого элемента.

В БГУИР, БГУ, Институте физики, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» ведутся исследования в области интегральной радио- и кремниевой фотоники. Это источники света – III-V/BiCMOS-лазеры, полупроводниковые лазеры с вертикальным и кольцевым резонатором; электрооптические модуляторы; волноводы, прежде всего планарные; фотоприемники УФ, видимого и ближнего ИК (до 5 мкм) диапазонов длин волн на базе гипердопированных атомами теллура слоев кремния на кремнии p-типа; фотонные компоненты на основе поверхностных плазмонов, в том числе с использованием графена; технологии 2,5D и 3D интеграции кремниевых электронных и фотонных интегральных схем, в том числе кремниевых интерпозеров.

**– Что, по вашему мнению, следует предпринять для эффективного функционирования отрасли?**

– В Программе «Развитие микроэлектронной промышленности Республики Беларусь на период до 2030 г.» определены мировые тренды микроэлектроники на 2026–2030 гг. Среди них названы



уже упомянутые мной молекулярная и квантовая микроэлектроника, спинтроника, магнетика и магнотные вычисления, стрейтроника, нейронные сети и нейроморфные вычисления, полупроводниковые квантовые точки. Объединение и взаимное проникновение этих направлений привело к появлению нано-био-информационно-когнитивных НБИК-технологий, и все это основано на использовании совершенно новых для полупроводниковой индустрии наноразмерных материалов, в том числе нуль-, одно- и двумерных с необходимыми свойствами. По оценке большинства независимых зарубежных экспертов, уже сегодня в этом сегменте занято столько же ученых и специалистов, сколько и в традиционной кремниевой полупроводниковой промышленности. Логично, что и количество исследований по данной тематике в ближайшие 10 лет будет только увеличиваться, как и финансирование в них. Поэтому наиболее верным путем дальнейшего развития микроэлектроники и электронной продукции является поиск эффективных материалов и композитов, новых областей применения, создания комплексных микроэлектронных изделий на новых принципах и технологиях. В этой связи целесообразно, на мой взгляд, начать работу по формированию Государственной программы научных исследований с условным названием «Микро- и наноэлектроника нового поколения» на 2026–2030 гг. с двумя разделами – фундаментальных и прикладных исследований. Тематика первого должна соответствовать новым альтернативным научным направлениям, второго – включать планирование конкретных технологий и устройств, которые могут быть доведены «до ума» в рамках государственных и государственных научно-технических программ. Хочу отметить, что для проведения экспериментальных исследований в области наноэлектроники необходимо сложное и весьма дорогое технологическое, сборочное и контрольно-измерительное оборудование. Частично оно имеется в Академии наук и в вузах, новое закупается ОАО «Интеграл» для отраслевой лаборатории новых технологий и материалов. Однако имеющейся базы явно не достаточно – нужно сосредоточить ресурсы и создать в различных организациях Республики Беларусь центры коллективного пользования, где новейшая техника будет предоставляться исследователям и разработчикам с оплатой только расходных материалов, а

ГКНТ станет ежегодно выделять средства на ремонт и частичное обслуживание такого оборудования.

Следует также организационно оформить межотраслевую руководящую структуру, управляющую этими работами, возможно, на основе кластера, придав ему более сильные права и обязанности.

По моему мнению, очень важно для обеспечения устойчивого функционирования и целевого роста имеющейся базы микроэлектроники, а также формирования ее экосистемы объединить усилия белорусских и российских коллективов, работающих в этих направлениях. В нашей стране это специалисты инновационно-промышленного кластера «Микро-, опто- и СВЧ-электроника», в РФ – консорциумов «Перспективные материалы и элементная база информационных и вычислительных систем» и «Консорциум дизайн-центров и предприятий радиоэлектронной промышленности РФ». На их партнерство и взаимодействие нацелено подписанное в сентябре 2022 г. межправительственное соглашение в области развития технологий, проектирования и производства электронной компонентной базы и электронного машиностроения. Необходима сильная интеграционная структура (совет, группа или т.п.) для координации исследований и разработок, объединения компетенций, обмена информацией, выработки стратегии и тактики общих усилий белорусских и российских ученых и производственников, для чего следует, на мой взгляд, подготовить совместное предложение по формированию научно-технической программы Союзного государства в данной сфере. Также предстоит оперативно создать центр обучения и стажировки специалистов, разработчиков и высококлассных технологов в данной предметной области.

Такие действия позволят создать опережающий научный задел и условия для нового витка микроэлектроники – важного элемента национальной безопасности и технологической независимости страны, устойчивости и конкурентоспособности отечественной промышленности. ■

Ирина ЕМЕЛЬЯНОВИЧ