

Номер заявки	Лот	Наименование проекта	Организация заявитель проекта	Организация-Заказчик технологического предложения	Ключевые слова	Аннотация проекта	Ожидаемые результаты реализации проекта
23-91-01001	1	Разработка специальных подложек кубического карбида кремния на кремнии (3C-SiC/Si) для роста транзисторных гетероструктур Ga(Al)N с высокой подвижностью носителей заряда (HEMT)	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук	АО "Эпиэл"	Кубический карбид кремния, 3C-SiC, кремний, Si, нитрид галлия, GaN, гетероструктуры, HEMT, широкозонные полупроводники	<p>Проект направлен на разработку научно-технологических основ управляемого синтеза специальных подложек с эпитаксиальным слоем SiC кубического политипа (3C-SiC) на кремнии, предназначенных для последующего роста транзисторных гетероструктур Ga(Al)N с высокой подвижностью носителей заряда (HEMT). Формирование слоя 3C-SiC на рабочей поверхности подложки кремния (Si) ориентацией (111) обеспечивает ряд преимуществ в последующем росте Ga(Al)N соединений (в сравнении с ростом на стандартном Si): лучшая согласованность параметров кристаллических решеток и коэффициентов термического расширения подложки и растущих слоев; защита «epi-ready» поверхности Si от разрушающего воздействия атомарного Ga; создание химического барьера, блокирующего твердофазную диффузию металлов III-группы в подложку Si (исключение автолегирования); улучшение технологичности процесса роста Ga(Al)N соединений на кремнии; уменьшение итоговой себестоимости гетероструктур Ga(Al)N на кремнии.</p> <p>Разработанная в результате выполнения данного проекта технология позволит создать первое в России высокотехнологическое опытное производство слоев 3C-SiC на кремниевых подложках. Специальные подложки 3C-SiC/Si могут стать основой для формирования целого класса широкозонных полупроводников на кремнии, основными из которых являются нитриды галлия и алюминия. В случае дальнейшего развития данной технологии и создания на ее основе опытно-промышленного производства возможно существенно развить одну из высокотехнологических областей микроэлектроники – производство гетероструктур нитрида галлия (GaN) для силовой и СВЧ электроники, в которой Россия могла бы занять лидирующее положение.</p> <p>Нитрид галлия - это полупроводниковое соединение группы III-N с шириной запрещенной зоны около 3,4 эВ, уникальные свойства которого позволяют формировать на его основе светоизлучающие структуры высокой мощности, а также транзисторные структуры с высокой подвижностью электронов (HEMTs) в двумерном квантовом канале (2DEG). Силовые инверторы на основе GaN позволяют эффективно производить преобразование токов высокой плотности, а силовые модули управления с GaN HEMTs производят интеллектуальное управление электродвигателями на недоступной для кремния частоте, что нашло особое применение в сфере электромобильного строения и конструирования современных беспилотных летательных аппаратов (дронов, квадрокоптеров и других). Выбор данного материала в столь широком спектре</p>	<p>В первый год реализации проекта будут достигнуты следующие результаты:</p> <ul style="list-style-type: none"> – разработана физическая модель процесса роста слоя кубического карбида кремния на кремниевой подложке ориентацией (111); – разработан базовый процесс формирования кубического карбида кремния на подложках кремния ориентацией (111); – изготовлены макетные образцы специальных подложек кубического карбида кремния на кремнии для роста транзисторных структур GaN диаметром до 100 мм; – проведены испытания макетных образцов специальных подложек. <p>Во второй год реализации:</p> <ul style="list-style-type: none"> – отработан экспериментальный процесс роста кубического карбида кремния на подложке Si(111) и эпитаксиальных структурах кремния с высокоомным слоем; – разработана эскизная технологическая документация на технологический процесс роста 3C-SiC на подложках и структурах кремния; – изготовлены экспериментальные образцы специальных подложек кубического карбида кремния на кремнии для роста транзисторных структур GaN диаметром до 100 мм; – проведены испытания экспериментальных образцов специальных подложек. <p>В третий год реализации проекта:</p> <ul style="list-style-type: none"> – отработан опытный процесс роста кубического карбида

					<p>применений обусловлен уникальными характеристиками GaN-приборов, такими как высокое напряжение пробоя, термо- и радиационная стойкость, высокая скорость переключения и пониженное рассеяние мощности и другими. На сегодняшний день, можно выделить следующие ключевые сферы применения гетероструктур на основе GaN: • светодиодная электроника, оптоэлектроника и фотоника, • силовая электроника диапазона до 650 В, • СВЧ-компоненты для систем связи поколения 5G, спутниковой связи, навигации и других. Однако на рынке отсутствуют доступные подложки GaN диаметром более 50,8 мм, что вызвано непреодолимыми технологическими барьерами существующих методов получения объемного кристалла нитрида галлия (крайне высокие температура и давление). Поэтому ожидается, что гетероэпитаксиальные структуры (гетероструктуры) нитрида галлия будут наиболее востребованными полупроводниковыми изделиями в мировой индустрии микроэлектроники и электронной техники будущих 5-10 лет. Основным достоинством подложки Si с точки зрения изготовителя приборов на основе GaN является возможность монолитной интеграции такой структуры в кремниевую КМОП технологию. Это было основной мотивацией для многих исследователей и инновационных предприятий начать разработки в данной области, несмотря на достаточно высокое рассогласование кристаллических решеток и различие ТКЛР между GaN и Si. К тому же, рабочая поверхность кремния становится аморфной в результате нитридизации в процессе роста III-N. Качество GaN, получаемого на подложках Si, значительно отличается (в худшую сторону) от качества аналогичных слоев на сапфире или SiC. Несмотря на это, LED и HEMT на основе GaN/Si структур уже сейчас достаточно распространены на рынке. Существует множество подходов к формированию гетероструктур GaN/Si, среди которых можно выделить использование промежуточных переходных слоев AlN, формирование буферных слоев на основе AlGaIn, рост на специально подготовленных упорядоченных подложках с помощью эффекта латерального разрастания GaN (epitaxial lateral overgrowth, ELO). Научная новизна предлагаемой разработки состоит из двух основных частей. Первая часть научной новизны относится к созданию транзисторных структур на основе соединений Ga(Al)N на кремнии. Создание подобных специальных подложек Si с буферным слоем SiC позволит впервые решить следующие стоящие перед микроэлектроникой на нитридах Ga(Al)N технологические задачи и проблемы:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Преодоление различия в параметрах решеток GaN и Si, которое составляет 14,8%. 2. Преодоление различия в линейных коэффициентах термического расширения решеток GaN и Si, которое составляет 115%. 3. Защита поверхности кремния от воздействия металлоорганических соединений и аммиака при последующем 	<p>кремния на подложке Si(111) и эпитаксиальных структурах кремния с высокоомным слоем; – доработан комплект технологической и конструкторской документации на специальные подложки кубического карбида кремния на кремнии для роста транзисторных структур GaN; – изготовлены опытные образцы специальных подложек кубического карбида кремния на кремнии для роста транзисторных структур GaN диаметром до 150 мм; – проведены испытания опытных образцов специальных подложек. Инновационный потенциал данной технологии состоит в его основной технологической составляющей – новой прорывной технологии выращивания буферного слоя карбида кремния на кремнии, на основе которого и будут формироваться слои других широкозонных полупроводников на кремнии. Данная технология позволяет создать в России новое высокотехнологическое производство монокристаллических слоев карбида кремния на кремниевых подложках. Монокристаллические пленки карбида кремния на кремнии широко востребованы современной микро и оптоэлектроникой. Основным продуктом в результате данного технологического предложения – уникальные специальные подложки кубического карбида кремния на кремнии для роста транзисторных структур GaN. Данный продукт после внедрения в производство может быть использован предприятиями-производителями гетероэпитаксиальных структур и силовой электроники на основе нитрида галлия. К таким</p>
--	--	--	--	--	---	---

					<p>наращивании III-N слоев из газовой фазы, тем самым улучшая структурное качество получаемых слоев. металлоорганические соединения металлов III группы, например, такие как триметилгаллия (ТМГ), разрушают поверхность кремния при стандартно используемой температуре процесса (выше 900 °С). Кроме того, наличие паров аммиака в камере реактора при температуре выше 900 °С приводит к нитридизации поверхности кремния, образуя аморфную прослойку Si₃N₄, на которой невозможно провести эпитаксиальный рост нитридов.</p> <p>4. Создание изолятора и химического барьера между Si и слоями III-нитридов. Данные функции крайне необходимы для формирования работоспособной транзисторной структуры GaN на стандартных проводящих подложках Si.</p> <p>Например, различие в величинах термических линейных коэффициентов расширения (ТКЛР) составляет для гексагонального GaN вдоль оси $\alpha^{GaN}=3,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, для гексагонального AlN ТКЛР вдоль оси $\alpha^{AlN}=4,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а ТКЛР 3C-SiC при T=900 K равен $3,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. У кремния ТКЛР равен $2,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Более близки и постоянные решеток соединений III-N к параметру решетки 3C-SiC, параметр решетки которого в плоскости (111) равен 0,308 нм. Покрытие 3C-SiC поверхности кремния обеспечивает рассогласование не более 4% с GaN и 1% с AlN. Таким образом, использование слоя 3C-SiC обеспечивает уменьшение механических напряжений и дефектности в кристаллической структуре GaN/Si. Уникальные структурные параметры 3C-SiC позволяют формировать гетероэпитаксиальные слои GaN с использованием более простой комбинации буферных слоев. Химическая инертность кубического карбида кремния к воздействию аммиака и хорошая смачиваемость нитридом галлия обеспечивают возможность формирования слоя гетероэпитаксиального GaN непосредственно на поверхности темплейта 3C-SiC/Si. Помимо этого, слой кубического карбида кремния выполняет функции изолятора и химического барьера между Si и слоями III-нитридов.</p> <p>Вторая часть научной относится собственно к методу получения специального типа подложек 3C-SiC. Разработанная технология получения специального типа подложек 3C-SiC, которая, помимо применений в синтезе транзисторных гетероструктур, будет играть огромную самостоятельную роль в производстве различных полупроводниковых пленок, и может быть также применена в дальнейшем выращивании толстых слоев кубического карбида кремния 3C-SiC для силовой электроники, и других целей. Последние, вообще, могут быть отделены от кремния.</p> <p>Предлагаемая к разработке технология формирования специальных подложек 3C-SiC/Si для последующего формирования транзисторных гетероструктур Ga(Al)N к настоящему времени в России никем не освоена. В то же время существует стратегическая необходимость производства подобных гетероструктур на отечественных предприятиях с</p>	<p>предприятиям относятся: АО «Эпиэл», АО «НИИМЭ», АО «НПП Салют», АО «ЗНТЦ», АО «НПП «Пульсар»</p>
--	--	--	--	--	---	---

						целью ликвидации зависимости от зарубежных источников отечественных производителей силовой электроники и СВЧ техники, в том числе производителей спецтехники. На сегодняшний день, важным фактором, определяющим отставание отечественной микроэлектроники от мирового уровня, является отсутствие отечественной технологии создания подобных специальных подложек, обладающих совместимостью с уже освоенной и развитой в РФ кремниевой КМОП технологией.	
23-91-01006	2	Исследование и моделирование конструкции транзисторных наногетероструктур типа AlGaN/GaN на подложках кремния и специальных подложках кубического карбида кремния на кремнии (3C-SiC/Si)	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники"	АО "Эпизэл"	Нитрид галлия, наногетероструктура, двумерный электронный газ, силовой GaN транзистор, моделирование, карбид кремния, кремний	Транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) на основе GaN являются многообещающими устройствами для будущих систем переключения мощности благодаря их превосходным характеристикам, таким как возможность работы в условиях высокой мощности и частоты, высокого напряжения пробоя и низкого сопротивления во включенном состоянии. В последние годы рядом мировых фирм, в том числе NTT-AT Япония, EPiGAN Бельгия, International Rectifier и др. был разработан технологический процесс эпитаксиального роста нитрид-галлиевых гетероструктур на кремниевых подложках диаметром 150, 200 мм, а также есть сообщения по диаметру 300 мм. Ожидается, что с развитием технологии силовой электроники на основе GaN силовые транзисторы на основе GaN найдут применение в электромобилях, центрах обработки данных и источниках питания. Чтобы повысить эффективность силовых электронных систем необходима монолитная интеграция комплементарных схем драйвера на основе GaN и силовых транзисторов GaN на одном кристалле [1–4]. В целях безопасности в силовых модулях GaN HEMT должны быть нормально закрытыми транзисторами. Для создания нормально закрытых транзисторов на основе нитридных гетероструктур существует множество методов, таких как использование структуры с утопленным затвором [5], покрывающий слой p-(Al)GaN [6], слой InGaN [7], и обработка ионами фтора [8]. Среди этих предложений чаще всего применяется p-GaN HEMT из-за его более высокой надежности. Для повышения эффективности работы p-GaN HEMT возможно также оптимизировать конструкцию затвора [9]. Кроме того, необходимо понимать какой эффект окажет воздействие той или иной операции технологической обработки гетероструктур или нанесение металлов и диэлектриков на конечные характеристики прибора. Конкретно, широкое распространение для силовых приложений ниже 650 В получили p-(Al)GaN HEMT транзисторы на кремниевых подложках [10–12]. В основном благодаря высокой подвижности электронов двумерного электронного газа (2DEG), высокому напряжению пробоя и недорогой кремниевой подложке. Ограниченное напряжение пробоя VBR препятствует разработке продуктов с p-GaN HEMT, работающих выше 1200 В. Для GaN-on-Si HEMT подложку необходимо заземлить для измерений VBR, а значение VBR ограничено по механизму вертикального пробоя [13, 14]. Наипростейший способ - увеличение толщины буфера (Al)GaN	В первый год реализации проекта будут достигнуты следующие результаты: – проведен анализ литературы по теме НИР; – разработана физическая модель буферного слоя (Al)GaN на Si подложке и на 3C-SiC/Si подложке; – разработана физическая модель конструкции барьерных и подзатворных слоев для силовых транзисторов нормально-закрытого типа; – разработана физическая модель конструкции барьерных и подзатворных слоев для СВЧ транзисторов нормально-открытого типа; – сформирован эпитаксиальным выращиванием подзатворный слой p-GaN; – сформированы буферные слои гетероструктуры на основе (Al)GaN на кремниевой подложке и на специальной подложке 3C-SiC/Si. Во второй год реализации проекта: – разработана физическая модель GaN транзистора с экранирующим электродом затвора; – разработана физическая модель GaN транзистора с экранирующим электродом истока; – разработана физическая модель конструкции нитридных гетероструктур для силовых транзисторов с p- каналом на кремниевых и 3C-SiC/Si

<p>является эффективным способом увеличить вертикальное напряжение пробоя. Буфер на основе GaN толщиной 5,5 мкм и буфер на основе AlGaN размером 4,6 мкм будут испытывать вертикальный пробой материала при 1207 В и 1380 В соответственно [15, 16]. Для p-GaN HEMT на кремнии, напряжение пробоя в подложку 1000 В было достигнуто для 4 мкм на основе AlGaN буфера и канального слоя GaN 500 нм. Напряжение пробоя было увеличено до 1344 В с помощью 5-мкм буфер GaN с высоким сопротивлением и канальный слой GaN толщиной 400 нм [17,18]. Однако из-за большого рассогласования решеток и температурного рассогласования очень трудно вырастить толстые буферные слои (Al)GaN на кремниевой подложке. Для этого применяют ухищрения в виде слоев SiNx, SiC или AlN, выращиваемых на кремниевой подложке. На сегодняшний день, наиболее распространенной и перспективной технологией создания темплейтов для роста III-N является формирование темплейтов кубического карбида кремния на кремнии (3C-SiC/Si). При комнатной температуре Si(111) обладает термическим коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) около $2,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и постоянной решетки 0,384 нм, в то время как N-полярный GaN(0001) имеет более высокий ТКЛР $5,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и постоянную решетки 0,319 нм параллельно плоскости роста. Приведенные различия являются основными причинами формирования высоких механических напряжений и дефектности слоев GaN/Si. В то же время, 3C-SiC обладает ТКЛР около $4,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и более близкой к GaN постоянной решетки 0,329 нм [19]. Использование переходного слоя 3C-SiC обеспечивает уменьшение различий ТКЛР и кристаллической структуры GaN/Si. Теплопроводность 3C-SiC сравнима с 4H-SiC, что обеспечивает лучшее рассеяние тепла при работе GaN-электроники. Кроме того, слой 3C-SiC выполняет роль химического барьера в процессе газофазного или молекулярно-лучевого наращивания (Al)GaN на кремнии. В любом случае, для учета всех основных критических моментов технологии создания силовых приборов необходимо использование современных методов приборно-технологического моделирования, как например в статье [20]. В случае моделирования как конструкции гетероструктур так и необходимой возможной топологии будущих транзисторов можно частично упростить процесс разработки новых изделий. Физическое и топологическое моделирование представляют собой важный этап на пути разработки и создания новых перспективных твердотельных силовых приборов и МИС на их основе. Предлагается провести разработку физических и топологических моделей передовых конструкций силовых транзисторов нормально-закрытого типа на основе гетероструктур из нитрида галлия на кремнии и на специальных подложках 3C-SiC/Si. В конструкцию должны войти характеристики буферного слоя для обеспечения пробивного напряжения на подложку не менее 650 В, параметры легирования и толщины слоев канала и барьера,</p>	<p>подложках; – изготовлены макетные образцы нитридных гетероструктур с высоколегированными локальными областями под контактами стока и истока. В третий год реализации проекта: – разработана физическая модель конструкции нитридных гетероструктур для СВЧ транзисторов на кремниевых и 3C-SiC/Si подложках; – проведены исследования особенностей топологии СВЧ и силовых GaN транзисторов с n- и p-каналом; – проведены исследования особенностей технологических процессов формирования затворов нормально открытого и нормально закрытого GaN транзистора; – разработана лабораторная технологическая инструкция по созданию GaN транзистора на 3C-SiC/Si подложках; – изготовлены макетные образцы нитридной гетероструктуры AlGaIn/GaN с p-GaN подзатворным слоем для создания нормально закрытых транзисторов; – изготовлены макетные образцы нитридной гетероструктуры с высоколегированными локальными областями под контактами стока истока; – проведены исследования особенностей формирования эпитаксиальным выращиванием нитридной гетероструктуры AlGaIn/GaN с p-GaN подзатворным слоем для создания нормально-закрытых транзисторов. Разработанные модели смогут применяться для прогнозирования результатов эксперимента. Ожидается, что рабочие параметры моделей будут удовлетворять стандартам</p>
---	--

						обеспечивающих протекание больших значений тока сток-исток, а также характеристики подзатворных слоев для эффективного управления нормально-закрытым транзистором. Кроме конструкции ожидается разработка маршрута создания транзистора на основе предложенной гетероструктуры, а также макетные образцы для подтверждения необходимых технологических эффектов, происходящих при создании транзистора.	построения силовых транзисторов.
23-91-01013	3	Исследование и разработка аналого-цифровой СБИС в специализированном корпусе для МЭМС-микрофона	Акционерное общество «ДИЗАЙН ЦЕНТР «СОЮЗ»	НПК "Технологический центр"	МЭМС-микрофон, СБИС, аналого-цифровой преобразователь, корпусирование.	Проект направлен на создание экспериментальных образцов кристаллов МЭМС емкостного типа и кристаллов СБИС для МЭМС-микрофона. Разрабатываемые экспериментальные образцы предназначены для отработки в рамках проекта технологических процессов изготовления интегральной аналого-цифровой СБИС в специализированном корпусе для МЭМС-микрофона. В рамках проекта предусмотрены теоретические и экспериментальные исследования, направленные на разработку схемы и топологии кристалла СБИС, отработку способов корпусирования кристаллов СБИС и кристаллов МЭМС в специализированном корпусе для МЭМС-микрофона, а также исследования характеристик экспериментальных образцов.	В результате реализации технологического предложения должны быть получены экспериментальные образцы СБИС и МЭМС емкостного типа в специализированных корпусах, а также разработана эскизная конструкторская и технологическая документация изготовления аналого-цифровой СБИС в специализированном корпусе.
23-91-01009	4	Разработка технологии МОС-гидридной эпитаксии полупроводниковых гетероструктур лазерных источников для гетерогенной интеграции Si/A3B5	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук	АО "ЗНТЦ"	МОС-гидридная эпитаксия, наногетероструктуры, лазерные квантово-размерные гетероструктуры, лазерные диоды, полупроводниковые лазеры, фотонные интегральные схемы, гетерогенная интеграция	Предлагаемый проект входит в технологическое предложение, направленное на разработку отечественной технологии инжекционных источников лазерного излучения, совместимых с групповой технологией создания фотонных интегральных схем на основе структур кремний на изоляторе (КНИ), как базовой платформой создания фотонных интегральных схем (ФИС). Такие ФИС обеспечивают кардинальное улучшение скоростных и энергетических характеристик оптических прием-передающих модулей (ППМ) за счет интеграции источников лазерного излучения в планарную интегральную схему, в которой сформированы компактных интегральные модуляторы, элементы мультиплексирования/демультиплексирования оптических сигналов. Это позволит создать высокоскоростные ППМ (трансиверы) как для отечественного телекоммуникационного оборудования, так и для центров обработки данных. Базовый подход для решения указанной проблемы в рамках проекта основан на использовании технологии гетерогенной интеграции структур КНИ, в которых сформированы основные функциональные элементы ФИС, и планарных структур АЗВ5, обеспечивающих формирование интегрированных инжекционных источников лазерного излучения. Таким образом, предлагаемый проект направлен на разработку технологии роста планарных полупроводниковых гетероструктур АЗВ5, как ключевого элемента инжекционных источников лазерного излучения в гетерогенно-интегрированных структурах КНИ/АЗВ5. Инжекционные источники лазерного излучения на базе гетерогенно-интегрированных структур КНИ/АЗВ5 основаны на явлении связанных сонаправленных волноводов. В случае ФИС сонаправленные волноводы формируются при гетерогенной	В результате выполнения проекта будут достигнуты следующие результаты: 1. Проведено моделирование, обосновывающее возможность получения оптимизированного дизайна планарных гетероструктур Al-In-Ga-As-P/InP с точки зрения состава, толщин, профилей легирования для инжекционных источников лазерного излучения на длину волны из спектрального диапазона из 1280-1360нм на основе гетерогенно-интегрированных КНИ /АЗВ5 структур со связанными волноводами. В моделировании должен быть продемонстрирован вывод излучения лазерной моды связанного волновода, сформированного в гетерогенно-интегрированной КНИ /АЗВ5 планарной структуре, в волновод, сформированный в КНИ структуре. 2. Разработана технология МОС-гидридной эпитаксии, которая будет позволять создавать конструкции полупроводниковых

интеграции КНИ/АЗВ5. В этом случае часть АЗВ5, содержащая область усиления из нескольких квантовых ям и волновод, располагается планарно на поверхности КНИ структуры, содержащей кремниевый волновод. Таким образом, формируется обобщенная мода, которая усиливается в инжекционной АЗВ5 части и частично распространяется в кремниевом волноводе. При этом должны быть обеспечены условия полного перетекания общей моды в кремниевый волновод, за счет латеральных конвертеров. Для выполнения данных требований требуется разработать планарные гетероструктуры АЗВ5, позволяющие реализовать указанные эффекты при гетерогенной интеграции с КНИ структурами. Решение указанной проблемы в части создания планарных гетероструктур АЗВ5 для инжекционных источников лазерного излучения в гетерогенно-интегрированных структурах КНИ/АЗВ5 основано на следующих подходах. (1) Разработка конструкций планарных структур АЗВ5, обеспечивающих формирование связанного волновода между КНИ и АЗВ5 частью. При этом разрабатываемая конструкция должна обеспечивать следующие условия: оптическое усиление общей лазерной моды связанного волновода, эффективного перевода общей моды в моду ФИС на основе КНИ, эффективную токовую накачку активной области при гетерогенной интеграции КНИ и АЗВ5 части. Другой важный фактор, определяющий актуальность данных исследований, связан с тем, что конструкции планарных структур АЗВ5, удовлетворяющие указанным требованиям, существенно отличаются от конструкций классических лазерных гетероструктур. Это требует разработки не только оптимальных дизайнов, но также и технологии эпитаксиального роста планарных структур АЗВ5, которая позволит их реализовать и при этом обеспечить условия для проведения процесса гетерогенной интеграции КНИ и АЗВ5 структур. (2) Разработка технологии роста разработанных гетероструктур АЗВ5. В качестве базовой выбрана МОС-гидридная эпитаксия как наиболее технологичный способ формирования фосфор содержащих гетероструктур. Для реализации требуемого рабочего спектрального диапазона (1280-1360нм) разрабатываемые структуры АЗВ5 будут выполнены в системе твердых растворов Al-In-Ga-As-P/InP. (3) Разработка методик исследования и испытания разработанных планарных гетероструктур АЗВ5. В рамках данной части проекта будут разработаны методики, обеспечивающие исследования свойств и конструктивных особенностей разработанных АЗВ5 гетероструктур не только с точки зрения их структурных характеристик, но также характеристик достигаемых при гетерогенной интеграции и токовой инжекции. Для оптических исследований свойств связанных волноводов будут использоваться оригинальные методики, разработанные коллективом проекта для исследования внутренних оптических потерь в волноводах полупроводниковых лазерных структур. При выполнении

гетероструктур АЗВ5, для формирования связанных волноводов, для которых часть волноводной структуры сформирована в АЗВ5 гетероструктуре, а другая часть в структуре КНИ.

3. Планарные гетероструктуры для гетерогенной интеграции КНИ/АЗВ5 будут демонстрировать возможность создания торцевых источников лазерного излучения на длину волны 1300нм.

4. Разработан следующий комплект документов:

- отчет о НИР в соответствии с ГОСТ 7.32-2017;
- отчеты о патентных исследованиях в соответствии с ГОСТ Р 15.011-2022;
- эскизная документация на базовую технологию роста методом МОС-гидридной эпитаксии экспериментальных образцов гетероструктур In-Ga-Al-As-P/InP для гетерогенно-интегрированных КНИ /АЗВ5 источников лазерного излучения;
- маршрутные карты изготовления лабораторных и экспериментальных образцов;
- акты изготовления лабораторных и экспериментальных образцов;
- методики исследования лабораторных и экспериментальных образцов;
- протоколы исследования лабораторных образцов;
- программа и методики испытаний экспериментальных образцов;
- протоколы испытаний экспериментальных образцов.

						<p>проекта должны быть получены следующие основные результаты: разработана МОС-гидридная технология роста эпитаксиальных гетероструктур АЗВ5, позволяющих создавать гетерогенно-интегрированные КНИ/АЗВ5 структуры и инжекционные источники лазерного излучения, интегрированные с фотонными интегральными схемами на основе КНИ структур; разработана эскизная документация на технологию роста методом МОС-гидридной эпитаксии планарной инжекционной волноводной гетероструктуры In-Ga-Al-As-P/InP для гетерогенно-интегрированных КНИ /АЗВ5 источников лазерного излучения; разработаны конструкции и созданы экспериментальные образцы планарной инжекционной волноводной гетероструктуры In-Ga-Al-As-P/InP для гетерогенно-интегрированных КНИ /АЗВ5 источников лазерного излучения. Важно отметить, что все конструктивные и технологические решения будут разработаны в России впервые, при этом отсутствие подробной информации в открытых источниках позволяет говорить о новизне разрабатываемых решений также и на мировом уровне. Экономический эффект проекта выражается в реализации возможности изготовления отечественных высокоскоростных приемо-передающих модулей (трансиверов). Ежегодное потребление приемо-передающих модулей (трансиверов) в РФ составляет более 1 млн. штук. Доля высокоскоростных трансиверов составляет сегодня 5-10% процентов и вырастет до 60% в ближайшие 5 лет. Российское производство фотонных компонент высокоскоростных систем связи является необходимым условием для возможности проектирования и производства суверенных платформ управления критическими инфраструктурами РФ и гарантированного, в условиях технологической изоляции, обеспечения связности территории РФ и ее населения. В результате реализации данного проекта и технологического предложения будет достигнута максимальная экономическая эффективность на операциях сборки ФИС, при этом организация серийного производства трансиверов с применением ФИС запланирована и объявлена двумя крупнейшими производителями: Компания ООО «ФайберТрейд», г. Новосибирск, и ООО «НЕОРОС», г. Москва</p>	
23-91-01012	5	Разработка программных средств системы автоматизированного проектирования ЭКБ для создания ячеек энергонезависимой памяти на основе технологий	Федеральное государственное учреждение "Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" Российской Федерации	АО "НИИМЭ"	Системы автоматизированного проектирования и разработки (САПР), энергонезависимая память, ReRAM (Resistive random-access memory, резистивная память с произвольным	Проект направлен на создание оригинального программного обеспечения для моделирования элементов энергонезависимой памяти, разработку программной среды для проектирования ReRAM, FeRAM, MRAM элементов и оптимизации технологических решений, проведение экспериментальных исследований с целью валидации применяемых моделей и верификации разработанных программных средств. В настоящее время при создании электронных компонентов микроэлектроники необходимо учитывать множество специфических параметров конструкции и технологических операций, число которых может превышать 1000. Для оптимизации геометрических параметров и характеристик материалов требуется численное моделирование работы	Ожидаемые результаты. Реализация предложения направлена на создание отечественного программного обеспечения для автоматизированного проектирования элементов энергонезависимой памяти на основе технологий ReRAM, FeRAM, MRAM. В основу разработки будет положена многомасштабная схема моделирования в сочетании с

	ReRAM, FeRAM, MRAM, шифр «CoBa»	академии наук"		<p>доступом) , FeRAM (Ferroelectric RAM - сегнетоэлектрическая оперативная память), MRAM (magnetoresistive RAM - магниторезистивная оперативная память), математическое моделирование, физико-математические модели, компактные модели, электронная компонентная база телекоммуникационных систем, электронная компонентная база вычислительных систем, электронная компонентная база систем искусственного интеллекта</p>	<p>устройств. Особенностью моделирования элементов энергонезависимой памяти является необходимость учета широкого спектра пространственно-временных масштабов. Это затрудняет использование имеющихся на современном рынке программных продуктов. Ведущие производители САПР в области микроэлектроники пока не включают специализированные пакеты по моделированию компонентов энергонезависимой памяти в свои продукты. В России эта проблема осложняется санкционным режимом. В этой связи создание программного обеспечения для автоматизированного проектирования элементов энергонезависимой памяти и устройств на их основе является чрезвычайно актуальной задачей. Решение данной задачи позволит более точно оценивать перспективы различных технологий энергонезависимой памяти и будет способствовать развитию отечественных программных сред для технологических САПР. В настоящем проекте планируется реализация многомасштабной вычислительной схемы, объединяющей квантово-механическое, молекулярно-динамическое и Монте-Карло моделирование, а также моделирование на основе моделей дрейфа-диффузии структурных элементов. Это позволит проводить расчеты на основе первичной информации - данных о химическом составе материала и его кристаллической структуре. Такой подход обеспечит понимание детальных механизмов переключательной динамики элементов энергонезависимой памяти. С целью многовариантного анализа, актуального при проектировании и оптимизации устройств, будет разработан комплекс компактных вычислительных моделей. Такие модели основаны на представлении элемента как нелинейной динамической системы относительно переменной состояния, связанной с ключевой характеристикой процесса переключения. Применительно к ReRAM в качестве такой переменной выступает концентрация кислородных вакансий. Аналогичные уравнения относительно поляризации и намагниченности получены для FeRAM и MRAM элементов. Компактные модели, будучи достаточно экономичными в вычислительном отношении, могут быть эффективно использованы при многовариантном анализе и имитационном моделировании схемотехнических решений. Принципиальным моментом при использовании компактных моделей является идентификация параметров. Параметры модели определяются путем минимизации отклонения расчетных характеристик от наблюдаемых в экспериментах. При отсутствии экспериментальных данных, как, например, при поиске новых материалов для элементов энергонезависимой памяти, ключевую роль играют результаты прямого моделирования с использованием описанных выше детальных моделей. Таким образом, в рамках проекта будет построена иерархия вычислительных моделей различного уровня сложности, что позволит проводить как детальное моделирование протекающих процессов, так и многовариантный анализ,</p>	<p>развитой системой информационной поддержки и методами интеллектуального анализа данных для обработки экспериментальных и расчетных данных. Применение многомасштабного подхода, современных методов интеллектуального анализа данных и развитой интеграционной платформы позволит создать эффективную среду для:</p> <ul style="list-style-type: none"> – компьютерного моделирования элементов энергонезависимой памяти и устройств на их основе; – создания баз данных по материалам, основным элементам с целью хранения, анализа и обработки результатов измерений и испытаний; – построения компактных вычислительных моделей на основе анализа теоретических и экспериментальных данных; – создания моделей верификации и валидации цифровых двойников элементов энергонезависимой памяти и ячеек памяти на их основе; – разработки механизмов обратной связи с целью определения путей уточнения спецификаций проектируемых элементов и выполнения необходимых доработок; – проведения комплексных исследований по изучению поведения элементов энергонезависимой памяти в критических режимах при превышении допустимых параметров; – создания на основе цифровых двойников элементов энергонезависимой памяти экспертных систем для прогнозирования надежности и сроков бесперебойной работы при различных внешних воздействиях и условиях эксплуатации.
--	---------------------------------	----------------	--	--	--	---

					<p>необходимый в ходе проектирования и оптимизации устройств рассматриваемого класса. С целью валидации математических моделей и верификации программных средств в рамках проекта будут созданы экспериментальные образцы ячеек энергонезависимой памяти на основе технологий ReRAM, FeRAM, MRAM. Важной составляющей разрабатываемой программной среды станет система информационной поддержки автоматизированного проектирования. Она будет оснащена развитыми базами данных по основным элементам энергонезависимой памяти с целью хранения, анализа и обработки результатов измерений и испытаний. В этой связи особую актуальность приобретает реализация в системе методов интеллектуального анализа данных. Использование таких методов применительно к элементам и системам энергонезависимой памяти позволит существенно повысить эффективность проектирования и технологических решений, а также, объединив ресурсы физического и вычислительного экспериментов, подойти к созданию цифрового двойника с целью контроля устройства в течение всего срока его эксплуатации. В рамках проекта будут разработаны:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Математические модели, описывающие с различной степенью детализации физические процессы, протекающие в элементах энергонезависимой памяти на основе технологий ReRAM, FeRAM, MRAM. 2. Вычислительные алгоритмы для численной реализации математических моделей. 3. Программные модули, реализующие разработанные вычислительные алгоритмы. 4. Система информационной поддержки расчетов, включающая базы данных, содержащие информацию о свойствах материалов, характеристиках приборов и других параметрах. 5. Интерфейсы, необходимые для взаимодействия с другими программными продуктами, такими как CAD-системы, SPICE, программы для анализа данных. 6. Средства визуализации результатов моделирования. <p>Разработка ПО «CoBa» предусматривает сборку ПО из его составных частей, верификацию ПО путем сопоставления решений с экспериментальными данными, полученными на структурах FeRAM, MRAM и ReRAM, разработку описания и паспорта ПО «CoBa», сопровождение в течение 3 лет. Реализация проекта позволит автоматизировать процессы проектирования элементов энергонезависимой памяти на основе технологий ReRAM, MRAM, FeRAM, проводить многоуровневые и распараллеленные расчеты в автоматизированном режиме на высокопроизводительных вычислительных комплексах, наращивать классы решаемых задач, добавляя новые вычислительные модули и создавая оригинальные расчетные сценарии, предоставит возможность интеграции с существующими TCAD решениями.</p>	<p>Таким образом, будет создано передовое программное обеспечение для моделирования, проектирования и оптимизации конструкции элементов памяти, которое позволит инженерам и исследователям изучать поведение различных устройств энергонезависимой памяти, включая ReRAM, FeRAM, MRAM. Развитые средства прогнозирования и оптимизации устройств позволят сократить время выхода на рынок, повысить надежность и производительность, что делает разрабатываемую систему мощным инструментом в разработке технологий следующего поколения. Выявление потенциальных проблем и оптимизация структур на этапе компьютерного моделирования позволит избежать дорогостоящих экспериментов, снизить время и затраты на исследования и разработку устройств энергонезависимой памяти. Планируемая разработка предполагает высокую гибкость по сравнению с конкурентами, позволяя конфигурировать вычислительные модели в соответствии с конкретными исследовательскими потребностями и модифицировать модели по мере поступления новых данных.</p>
--	--	--	--	--	---	---

23-91-01003	6	Доработка критических элементов технологии в целях организации серийного производства бескорпусных GaAs СВЧ МИС с проектной нормой до 0,25 мкм для радиоаппаратуры систем навигации, телекоммуникации и радиолокации диапазона частот до 40ГГц.	Акционерное общество "Светлана-Рост"	АО "ЦКБА"	Арсенид галлия, СВЧ монолитная интегральная схема, критический элемент технологии, уровень готовности технологии, выход годных, коэффициент запуска.	Проект направлен на повышение уровня готовности отечественной стандартной технологии проектирования и производства СВЧ МИС на основе арсенида галлия путем доработки ее критических элементов, с целью организации серийного производства широкой номенклатуры СВЧ ЭКБ для систем радиоэлектронной аппаратуры, определяющих вектор развития целых отраслей промышленности и лежащих в основе сразу нескольких направлений стратегической инициативы «Технологический рывок». Реализация проекта станет основой значительного увеличения доли отечественной ЭКБ в СВЧ-электронике, вплоть до полного импортозамещения в ее отдельных секторах, и в конечном счете способствует достижению технологического суверенитета РФ.	<p>Результатом реализации проекта станет достижение уровня готовности отечественной технологии, достаточного для организации импортонезависимого серийного производства в целях бесперебойного, гарантированного выпуска требуемого объема и качества критической СВЧ ЭКБ на основе арсенида галлия диапазона частот до 40 ГГц.</p> <p>Структура и методологическая основа построения стандартной технологии, предлагаемой к доработке, предполагает возможность широкого использования полученных результатов всеми заинтересованными участниками отечественного рынка за счет предоставления безвозмездного доступа к комплексному инструменту проектирования и масштабированию производства по организационной модели foundry.</p> <p>Результатом реализации проекта станет достижение уровня готовности отечественной технологии, достаточного для организации импортонезависимого серийного производства в целях бесперебойного, гарантированного выпуска требуемого объема и качества критической СВЧ ЭКБ на основе арсенида галлия диапазона частот до 40 ГГц.</p> <p>Структура и методологическая основа построения стандартной технологии, предлагаемой к доработке, предполагает возможность широкого использования полученных результатов всеми заинтересованными участниками отечественного рынка за счет предоставления безвозмездного</p>
-------------	---	---	--------------------------------------	-----------	--	--	---

							<p>доступа к комплексному инструменту проектирования и масштабированию производства по организационной модели foundry.</p> <p>Результатом реализации проекта станет достижение уровня готовности отечественной технологии, достаточного для организации импортонезависимого серийного производства в целях бесперебойного, гарантированного выпуска требуемого объема и качества критической СВЧ ЭКБ на основе арсенида галлия диапазона частот до 40 ГГц.</p> <p>Структура и методологическая основа построения стандартной технологии, предлагаемой к доработке, предполагает возможность широкого использования полученных результатов всеми заинтересованными участниками отечественного рынка за счет предоставления безвозмездного доступа к комплексному инструменту проектирования и масштабированию производства по организационной модели foundry.</p>
23-91-01015	8	<p>Разработка ПАВ для безметалльного проявителя, использующегося в процессах фотолитографии и с проектными нормами 180–90нм и ниже, и освоение его микротоннажно го производства. Шифр «ПАВ»</p>	<p>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук</p>	АО "НИИМЭ"	<p>поверхностно-активное вещество, олигомер на основе окиси этилена и пропилена, безметалльный проявитель, содержание металлов, молекулярно-массовые характеристики, поверхностное натяжение</p>	<p>В феврале 2023 г. Президент Российской Федерации отметил, что за короткий срок России предстоит создать или вывести на новый уровень собственные критически важные технологии в микроэлектронике, информационных технологиях, промышленности, транспорте, разработке лекарств, новых материалов, а также в других важнейших для страны направлениях. Возможность самостоятельного развития отечественной микроэлектронной промышленности определяется необходимостью разработки (включая обязательное проведение научных исследований) и производства всего комплекса – материалов, технологического оборудования и систем автоматизированного проектирования для производства изделий микроэлектроники. Что касается материалов, то для производства всей номенклатуры полупроводниковых приборов и интегральных схем используется примерно 20 тысяч наименований материалов, из них критичными, от которых зависят характеристики изделия, являются примерно 1 000 наименований. Следует подчеркнуть,</p>	<p>В результате выполнения проекта будут достигнуты следующие результаты:</p> <ul style="list-style-type: none"> – организовано микротоннажное производство ПАВ мощностью не менее 10 кг/год на базе ФИЦ ПХФ и МХ РАН; – создана опытная установка синтеза поверхностно-активного вещества для безметалльного проявителя мощностью не менее 10 кг/год; – изготовлены экспериментальные образцы ПАВ в количестве не менее 3-х шт. по 15 г; – изготовлены опытные образцы ПАВ в количестве не менее 3-х

что к материалам для микроэлектроники предъявляются особые требования по чистоте. Так, производство интегральных схем с нанометровыми топологическими размерами требует использования реагентов со степенью чистоты до 0,1 ppb ($0,1 \cdot 10^{-6}$ масс.%) по содержанию каждой из более десяти контролируемых примесей катионов, и с регламентированным содержанием частиц размером > 100 нм. Высокая очистка материалов от ионов металлов чрезвычайно важна, поскольку остаточные либо привнесенные загрязнения металлов растворяются в слое кремниевой подложки SiO₂, нарушая характеристики работы транзистора, ухудшают результаты термического окисления, изменяют время жизни носителей заряда и т.д. Загрязнения металлов могут диффундировать вглубь кристалла в ходе высокотемпературных обработок, образуя энергетические уровни в запрещенной зоне, увеличивая токи утечки, что, в конечном счете, приводит к увеличению количества бракованных изделий. Отметим, что процесс фотолитографии для производства интегральных схем является достаточно сложным и материалоемким. При этом индустрия микроэлектроники постоянно сокращает размер элементов интегральных схем, которые состоят из ряда функциональных слоев с рисунком (изоляторы, металлические провода). Структура каждого слоя переносится с маски с помощью фотолитографического процесса с последующим травлением и ионной имплантацией с получением элементов требуемых размеров. В процессе фотолитографии функциональный слой подложки покрывается фоторезистивной пленкой из химически усиленного фоторезиста, состоящего из полимера с кислотнo-лабильной подвешенной защитной группой, молекул - фотогенераторов кислот (ФГК) и дополнительных добавок. При воздействии ультрафиолетового излучения через маску с рисунком ФГК разлагается, делая нерастворимый полимер растворимым в щелочном проявителе (позитивные фоторезисты). При мокром проявлении с использованием, например раствора гидроксида тетраметиламмония, экспонированные участки резиста удаляются, и остается рисунок из неэкспонированных линий фоторезиста. Чтобы выполнить требования по минимизации размера элемента, ширина фоторезистивных структур должна, соответственно, уменьшаться. При этом их высоту уменьшать нельзя, поскольку необходимо сохранить стойкость к плазмохимическому травлению. Это приводит к резкому увеличению отношения высоты линии к ее ширине (аспектного отношения), с ростом которого механическая прочность линий фоторезиста снижается, что приводит к «схлопыванию» (коллапсу) структур. Было показано, что этот, так называемый, коллапс рисунка вызван несбалансированными капиллярными силами, действующими между линиями во время стадии сушки после проявления. Среди различных подходов, позволяющих предотвратить коллапс линий фоторезиста, наиболее простым представляется уменьшение капиллярных сил добавкой в

шт. по 200 г;
– изготовлена опытная партия ПАВ в количестве не менее 1000 г;
– разработан комплект технологической документации (ТД), предназначенный для изготовления экспериментальных образцов ПАВ (пусковая записка);
– разработана рабочая конструкторская документация, предназначенная для изготовления установки для наработки опытной партии ПАВ;
– разработана рабочая технологическая документация (ТД) с присвоением литеры «О1», предназначенная для изготовления опытных образцов ПАВ;
– ТУ на ПАВ с присвоением литеры «О1».

					<p>проявитель поверхностно-активных веществ (ПАВ). Известно, что в качестве такого рода ПАВ могут быть эффективно использованы катионные, однако возникают сложности с их очисткой от микропримесей ионов металлов. Еще одним недостатком ПАВ катионного типа является достаточно высокая цена таких продуктов. Анионактивные ПАВ несмотря на то, что снижают поверхностное натяжение в большей степени, обладают довольно высокой пенообразующей способностью, что недопустимо, так как может привести к возникновению дефектов при проявлении. По этой причине наиболее целесообразным представляется использование неионогенных ПАВ, например, блоксополимеров окиси этилена и окиси пропилена. ПАВ высокой степени чистоты до последнего времени закупались за рубежом, а в настоящее время они находятся в санкционных списках. Современное производство микроэлектроники остро нуждается в создании отечественных аналогов подобных материалов, в связи с этим необходима разработка технологии получения неионогенных ПАВ высокой степени чистоты, что и является целью настоящей работы. В ходе выполнения проекта будет разработана технология получения неионогенного поверхностно-активного вещества для безметального проявителя, представляющего собой сополимер окиси этилена с окисью пропилена. Новизна разрабатываемой технологии состоит в проведении всех стадий процесса в одном реакционном сосуде, что позволит избежать контакта получаемого ПАВ с окружающей средой и загрязнения его примесями металлов, которые могут попадать в образец, в том числе и с пылью. Преимуществом разрабатываемой технологии будет использование катионного механизма полимеризации, который приводит к меньшему загрязнению такими сложно удаляемыми катионами как натрий и калий, в большом количестве присутствующим в олигомерах и полимерах, полученных по анионному механизму. Разработка технологии будет включать проведение исследований с целью подбора оптимального количества катализатора, сокатализатора и соотношения компонентов для получения олигомерного ПАВ с необходимыми свойствами (структура, молекулярно-массовые параметры; поверхностное натяжение), отработку оптимальных технологических режимов. В результате будет разработана технология производства и создана установка мощностью не менее 10 кг/год для получения неионогенного поверхностно-активного вещества, обладающего следующими характеристиками: массовая доля воды не более 0,5 мас.%; металлов, перечисленных в техническом задании, не более 50 ppb, динамическое поверхностное натяжение раствора ПАВ в ТМАГ в диапазоне 45,0 – 58,0 мН/м и статическое поверхностное натяжение раствора ПАВ в ТМАГ в диапазоне 31,0 – 39,0 мН/м.</p>	
--	--	--	--	--	--	--

23-91-01005	9	<p>Разработка библиотеки топологий и моделей стандартных элементов и их апробация с целью создания методологии согласования импедансов мощных бескорпусных AlGaN СВЧ-транзисторов с проектной нормой до 0,5 мкм при проектировании и аппаратуры систем навигации, телекоммуникации и радиолокации L-, S- и C-диапазонов</p>	Акционерное общество "Светлана-Рост"	АО "УПКБ "Деталь"	<p>Нитрид галлия, СВЧ-транзистор, выходная мощность, библиотека стандартных элементов, согласование импедансов, суммирование мощности</p>	<p>Проект направлен на развитие отечественной технологии проектирования и производства критической СВЧ ЭКБ на основе нитрида галлия для радиоэлектронной аппаратуры систем навигации, управления движением, телекоммуникации, на сегодняшний день определяющих вектор развития целых отраслей промышленности и лежащих в основе сразу нескольких направлений стратегической инициативы «Технологический рывок». На сегодняшний момент технология Исполнителя обеспечивает мелкосерийное производство кристаллов СВЧ-транзисторов мощностью 15-30 Вт, используемых при проектировании и изготовлении гибридных интегральных схем усилителей мощности. Такой подход достаточно трудоемок, не позволяет применять принципы сквозного проектирования и накладывает очевидные ограничения на массогабаритные параметры устройств. Разработка и апробация библиотеки топологий и моделей стандартных элементов (в первую очередь – транзисторов) позволит коренным образом расширить возможности разработчиков ЭКБ в процессе согласования импедансов мощных транзисторов при построении гибридных схем усиления, а в перспективе- стать краеугольным камнем в создании комплексного инструмента проектирования монолитных схем.</p>	<p>Результатом выполнения проекта станет создание опытного образца библиотеки стандартных элементов на основе AlGaN полевых транзисторов с длиной затвора 0,5 мкм, являющейся важнейшей составной частью комплексного инструмента проектирования в составе любой стандартной технологии производства СВЧ ЭКБ. Это позволит, как минимум, существенно повысить эффективность проектирования гибридных интегральных схем, а также перейти к следующим шагам - проведению комплекса испытаний библиотеки (в том числе - испытаний на безотказность) и созданию комплексного инструмента проектирования. В конечном итоге, результаты реализации технического предложения направлены на обеспечение бесперебойного, гарантированного и импортонезависимого выпуска требуемого объема и качества критической СВЧ ЭКБ на основе нитрида галлия, играющей значительную роль в достижении технологического суверенитета РФ.</p>
-------------	---	---	--------------------------------------	-------------------	---	--	---

23-91-01007	10	<p>Разработка технологического процесса формирования эпитаксиальных слоев германия для рpн диодов (фотодетекторов) на длину волны 1,31 мкм, сопряженных с кремниевой волноводной структурой.</p>	<p>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук</p>	АО "ЗНТЦ"	<p>Высокоскоростная передача данных, фотонные интегральные схемы, Ge-фотодетекторы, рpн фотодиоды, гетерогенная сборка, кремниевая технология, эпитаксия.</p>	<p>В результате работы будут достигнуты следующие результаты:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Разработан технологический процесс формирования эпитаксиальных слоев германия для рpн диодов (фотодетекторов) на длину волны 1,31 мкм, сопряженных с кремниевой волноводной структурой и имеющих характеристики, необходимые для работы в составе кремниевых фотонных интегральных схем. 2. Выпущена следующая научно-техническая продукция: <ul style="list-style-type: none"> – Промежуточные и заключительные научно-технические отчеты о выполнении Проекта, отражающие результаты работ в соответствии с ГОСТ 3.1105-2011. – Отчет о патентных исследованиях по теме Проекта в соответствии с ГОСТ Р 15.011-2022. – Программы и методики исследования тестовых и опытных образцов. – Акты изготовления тестовых образцов эпитаксиальных структур Ge на кремнии. – Протоколы исследований тестовых образцов эпитаксиальных структур Ge на кремнии. – Маршрутная карта технологического процесса изготовления рpн-диода на кремнии в дискретном исполнении в виде меза-структуры (макета фотодетектора) – Протоколы испытаний макета рpн-диода на кремнии в дискретном исполнении в виде меза-структуры (макета фотодетектора). – Маршрутная карта технологического процесса эпитаксиального роста Ge в окнах SiO₂ на структурах кремний на
-------------	----	--	--	-----------	---	--

							<p>изоляторе (КНИ).</p> <ul style="list-style-type: none"> – Акты изготовления германиевых pin структур в окнах SiO₂ на КНИ. – Акты и протоколы испытаний опытных образцов Ge фотодетекторов, сопряженных с кремниевой волноводной структурой. – Тестовые образцы эпитаксиальных структур Ge на кремнии. – Тестовые образцы pin-диода на кремнии в дискретном исполнении в виде меза-структуры. – Опытные образцы Ge фотодетекторов, сопряженных с кремниевой волноводной структурой.
23-91-01014	12	Разработка технологического процесса флип-чип монтажа кристаллов с алюминиевой металлизацией на интерпозер, подложку, корпус	Акционерное общество "Зеленоградский нанотехнологический центр"	АО «НИИМА «Прогресс»	Стад-бамп, алюминиевая контактная площадка (Al-Кп), интерпозер, UBM, объемная сборка, Flip-chip, TSV.	<p>Широкое распространение в отечественной и зарубежной микроэлектронике в производстве интегральных схем в настоящее время получила технология flip-chip (далее флип-чип), особенностью которой является коммутация кристаллов через припойные шариковые выводы, располагаемые на металлизированных контактных площадках (далее - КП) кристаллов интегральных схем (далее – ИС). Кристаллы монтируют на основание корпусов, интерпозерах, плат планарной стороной лицом к лицу. При этом топология КП подложки является зеркальным отображением расположения выводов кристалла. Использование припойных шариковых выводов, сформированных по технологии флип-чип, обеспечивает не только электрическую связь между кристаллом ИС и подложкой, но также обеспечивают теплоотвод, механическую прочность и температурную стойкость. Соединения на припойном шарике, по сравнению с проволочными, снижают задержки передачи электрических сигналов, обеспечивают большую пропускную способность и снижают ограничения по шинам питания и заземления. Применение флип-чип монтажа также способствует миниатюризации изделия. Коммутация кристалла с интерпозером через припойные шарики вытесняет проволочный монтаж, значительно уменьшая массогабаритные характеристики микросхем. Общий размер площади микросхемы, реализованной методом флип-чип, сводится к сумме размера кристалла и высоты шариковых выводов. Данная технология монтажа позволяет существенно уменьшить занимаемую площадь кристаллов в корпусе по сравнению со стандартной термовзвучковой технологией сварки микропроволокой. Также пропускная способность при сверхвысоких частотах при технологии флип-чип гораздо выше чем при проволочной разварке за счет малой длины</p>	<p>В результате выполнения проекта будут достигнуты следующие результаты:– сформированы технические требования к технологии объемной 3D сборки;– рассмотрены технологические особенности формирования стад-бампов термовзвучковой сваркой на кремниевых кристаллах с алюминиевой металлизацией контактных площадок;– разработаны КД и ТД для макетной сборки потенциального решения;– разработаны элементы правил проектирования (PDK) для кремневых интерпозеров – конструкторско-технологические ограничения (КТО) для проектирования топологии кремневых интерпозеров;– на основе разработанной КД и ТД проведена разработка и изготовление макетных образцов объемных сборок на основе технологии флип-чип с применением стад-бампов на AL КП и припойных бампов с применением кремневых интерпозеров. Количество изготавливаемых сборок не более 30 шт.- проведены климатические</p>

				<p>коммутации. Важную роль при формировании припойных шариковых выводов играет материал металлизации кристалла, на который наносятся шариковые выводы. Поверхность должна иметь хорошую адгезию к припойному шарiku без применения флюсов. Золото является одним из наиболее подходящим материалом. В массовом производстве золочение проводят на уровне пластины с формированием на алюминиевой КП тройного слоя металлов –цинк-никель-золото, называемый - Under Bump Metallization (далее UBM). В основном контактные площадки современных интегральных схем состоят из сплавов на основе алюминия. Несмотря на то, что алюминий обладает относительно высоким удельным сопротивлением по сравнению с другими металлами, такими как медь, типовая металлизация на его основе не предназначена для применения в технологии флип-чип. Для преодоления этого ограничения в данной работе будет разработана технология, в которой в качестве UBM-слоя под припойный шариковый вывод будет использован stud-bump - первая точка сварного соединения, сформированного методом «шарик-клин» при термозвуковом методе сварки (далее стад-бамп) с последующей планаризацией и нанесением на него припойного шарикового вывода. Прямое соединение чистого золота с алюминием образует интерметаллид, который ухудшает надежность соединения. В работе будет произведен подбор микропроводок и режимов для улучшения надежностных показателей. В качестве подложки в работе будет разработан кремниевый интерпозер, имеющий сквозные металлизированные отверстия (по технологии TSV), для коммутации кристаллов между собой и проведения параметрических тестов. Для интерпозера будут разработаны конструкторско-технологические ограничения (КТО) для проектирования топологии</p>	<p>испытания изготовленных объемных сборок.</p>
--	--	--	--	--	---