

ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА В РОССИИ

ИНСТИТУТ СВЧПЭ РАН – ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ

П.Мальцев, д.т.н., директор ИСВЧПЭ

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН) был создан в апреле 2002 года, а с декабря 2011-го переименован в Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники" РАН.

Деятельность Института связана с проведением фундаментальных и прикладных разработок в области сверхвысокочастотной (СВЧ) и крайне высокочастотной (КВЧ) полупроводниковой электроники по следующим направлениям:

- элементная база микроэлектроники, наноэлектроники и квантовых компьютеров, материалы для микро- и наноэлектроники, нано- и микросистемная техника, твердотельная электроника (расчет и моделирование гетероструктурных униполярных и биполярных приборов на частоты до 200–250 ГГц и выше; разработка систем на кристалле с интегрированными антеннами и усилителями с диапазоном частот 50–250 ГГц и гетероструктурных СВЧ МИС для систем беспроводной связи, бортовых радаров, высокочувствительных радиометров и т.д.);
- нанотехнологии, нанобиотехнологии, наносистемы, наноматериалы, нанодиагностика, наноэлектроника и нанофотоника (технология и физика квантово-размерных гетероструктур; разработка новых классов высокочастотных гетероструктурных приборов; микро- и нанотехнология формирования коротко-канальных гетероструктурных СВЧ-приборов; создание терагерцевых устройств для частот от 300 до 900 ГГц.

НЕМНОГО ИСТОРИИ

Утверждать, что Институт создан в 2002 году, не совсем правильно. Предпосылки для его формирования появились в начале 1980-х годов, когда основатель Института и его первый директор Владимир Григорьевич Мокеров работал в Зеленограде в НИИ молекулярной электроники (НИИМЭ). Уже тогда В.Г.Мокеров с сотрудниками переключились на гетероструктурную электронику, поскольку осознали "чрезвычайную перспективность

зарождавшегося направления" (слова В.Г.Мокерова, неопубликованное интервью журналу "ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ"). Именно гетероструктуры дали мощный импульс развитию современной твердотельной СВЧ-электроники, созданию нового поколения телекоммуникационных и локационных систем. Быстро освоив технологию молекулярно-лучевой эпитаксии гетероструктур AlGaAs/GaAs, В.Г.Мокеров с сотрудниками разработал первые отечественные гетероструктуры

с электронной подвижностью выше 10^6 см²/ (В·с) (при T=4,2K), что в то время соответствовало лучшим мировым достижениям.

Основные разработки отдела под руководством В.Г.Мокерова в тот период:

- первый отечественный НЕМТ (high electron mobility transistor) – транзистор с высокой подвижностью электронов;
- логические вентили с рекордной для того времени (1983 год) задержкой распространения сигнала менее 30 пс;
- технология первых НЕМТ БИС ОЗУ с субнаносекундным быстродействием (время выборки менее 0,8 нс).

Тогда же (1983–1985 годы) состоялась встреча В.Г.Мокерова с будущим Нобелевским лауреатом, выдающимся ученым, академиком Жоресом Ивановичем Алферовым. В.Г.Мокеров вошел в состав академической секции "Полупроводниковые гетероструктуры", через которую Ж.И.Алферов руководил и координировал фундаментальные и прикладные исследования в этой области по всей стране. На В.Г.Мокерова как представителя электронной промышленности было возложено руководство работами в области гетероструктурной электроники.

В начале 1989 года в связи со сворачиванием работ по гетероструктурам В.Г.Мокеров по приглашению академика Ю.В.Гуляева перешел в Институт радиотехники и электроники (ИРЭ) Академии наук. Это было время стремительного разрушения экономики, в том числе и электроники. Потрясения не обошли стороной и Академию наук. Начался массовый отток российских ученых за рубеж, распадались знаменитые и, казалось бы, несокрушимые научные коллективы, НИИ и заводы. В таких условиях В.Г.Мокеров создает институт СВЧ полупроводниковой электроники, формирует и укрепляет научный коллектив, продолжает проводить исследования в области физики и технологии гетероструктур и приборные разработки.

Необходимость в таком институте назрела давно, поскольку в российском "гетероструктурном мире" сложилась парадоксальная ситуация. С одной стороны, в институтах РАН были получены выдающиеся научные результаты в области физики и технологии наногетероструктур. А с другой стороны, реального применения в промышленной электронике эти технологии не находили: в России в то время не производились ни транзисторы, ни тем более микросхемы на гетероструктурах.

Именно для "сращивания" высокой "гетероструктурной" науки с электроникой и нужен был институт, который наряду с фундаментальными исследованиями физики и технологии гетероструктур, разработкой новых гетероструктурных приборов был призван

Памяти Владимира Григорьевича Мокерова

20 мая 2015 года в ИСВЧПЭ РАН состоялось расширенное заседание Ученого совета, посвященное 75-летию создателя Института, члена-корреспондента РАН **Владимира Григорьевича Мокерова (02.05.1940 – 23.09.2008)**.

В заседании приняли участие вице-президент РАН, академик **Жорес Иванович Алфёров** и член Президиума РАН, академик **Юрий Васильевич Гуляев**.

30 лет назад Владимир Григорьевич Мокеров начал работу по формированию научного коллектива Института: в 1985 году – в составе отдела НИИ молекулярной электроники и завода "Микрон" (Зеленоград), а с 1989-го – в составе Центра Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН. В 2002 году Институт, учредителем которого ныне является ФАНО России, стал самостоятельной организацией, которую член-корреспондент РАН В.Г.Мокеров возглавлял в 2002–2008 годах.

Все выступающие отмечали, что В.Г.Мокеров сумел сделать то, что не удавалось почти никому, – в период общего разрушения экономики в начале 2000-х годов создать Институт СВЧ полупроводниковой электроники и за короткий срок вывести его разработки на уровень мировых достижений. Пусть не в серийном, но в опытном производстве. Тем самым в нашей стране было спасено одно из наиболее важных сегодня направлений развития промышленных технологий. Владимир Григорьевич оставил печатные труды, научные работы и достижения уровня открытий.

Институт СВЧ полупроводниковой электроники – это Дело, которому В.Г.Мокеров посвятил свою жизнь. И сегодня Институт продолжает активно работать.

В ИСВЧПЭ РАН проводится постоянно действующий семинар "Потенциальные возможности создания наногетероструктур для терагерцевого диапазона частот (свыше 300 ГГц) телекоммуникационных систем", руководит им чл.-корр. РАН д.ф.-м.н. В.И.Рыжий.

Создан дизайн-центр моделирования, проектирования и технологической разработки наногетероструктурных СВЧ-транзисторов и СВЧ монолитных интегральных схем под руководством главного конструктора-заместителя директора по НИОКР Ю.В.Фёдорова.



способствовать внедрению новых научных разработок в производство.

К этому времени стало меняться и отношение к СВЧ твердотельной электронике, которая определяла уровень развития радиолокации и широкополосных телекоммуникаций, где требовались все более высокие частоты (до сотен гигагерц) для сверхскоростной передачи данных.

ИНСТИТУТ СВЧПЭ В 2002–2010 ГОДЫ

В первые годы работы в Институте была создана уникальная, единственная в стране экспериментальная технологическая линия по изготовлению гетероструктурных приборов, которая охватывала весь цикл – от выращивания эпитаксиальных наногетероструктур до изготовления транзисторов и микросхем. В ее составе участок молекулярно-лучевой эпитаксии, где формировались гетероэпитаксиальные структуры, УФ- и электронная литография, а также весь необходимый комплект технологических установок – напыления металла, травления, формирования диэлектрических слоев и т.д.

Уникальными были и отдельные образцы оборудования. Например, электронный литограф с разрешением 100–150 нм, соответствующий мировому промышленному уровню, был фактически создан заново сотрудниками института на базе электронно-лучевого литографа EBMF-2 (Cambridge Instruments). В результате процесс электронно-лучевой литографии стал воспроизводимым и управляемым.

На установке контактной УФ-литографии были получены элементы с минимальными размерами, до 140 нм.

Более того, в технологии HEMT-транзисторов был разработан и освоен процесс формирования грибообразных затворов. Грибообразные затворы с малым размером "ножки" и одновременно большой площадью сечения "шляпки" уменьшают емкость и сопротивление затвора, а от этого зависят частотные свойства транзисторов. Разработка технологии получения таких затворов с применением многослойной системы электронных резистов была одним из главных достижений Института – полученные HEMT-транзисторы имели предельно высокие частоты.

С созданием единственной в стране технологической линии по изготовлению гетероструктурных приборов одновременно была решена еще одна важная задача – объединение производства гетероэпитаксиальных подложек и приборов, поскольку, как показали исследования, под каждую задачу (прибор, схему) надо разрабатывать уникальную гетероструктуру. Создание нового прибора (схемы) начинается с исследований параметров транзисторной структуры, с формирования

требований к гетероэпитаксиальным слоям, и только затем можно приступать к разработке схемы с заданными параметрами. Централизованные исследования, технологические разработки и изготовление опытных образцов в одном институте дали отличные результаты. Как следствие, к 2006 году 20-летнее отставание в области СВЧ-транзисторов было ликвидировано – на основе GaAs PHEMT-структур были получены малошумящие транзисторы для приемных каналов и мощные усилительные модули. Было достигнуто абсолютно рекордное значение коэффициента шума транзисторов – 0,35 дБ на частоте 10 ГГц. Мощные транзисторы имели удельную мощность более 1 Вт/мм (по отношению к ширине затвора) и КПД более 45%, что соответствовало лучшим зарубежным результатам.

Основные работы В.Г.Мокерова вошли в книгу "Наногетероструктуры в сверхвысокочастотной полупроводниковой электронике" (ТЕХНОСФЕРА, 2010, 432 с.)

ИНСТИТУТ СВЧПЭ В ПЕРИОД С 2010-ГО ПО НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ

После ухода из жизни Владимира Григорьевича (сентябрь 2008 года) в ИСВЧПЭ РАН продолжались начатые исследования и разработки. Основные из них:

- исследованы физические основы и создана технология молекулярно-лучевой эпитаксии гетероструктур на основе полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ с двумерным электронным газом для изготовления СВЧ- и КВЧ-приборов, включая PHEMT и MHEMT на подложках GaAs и InP;
- разработаны принципы проектирования и созданы библиотеки пассивных и активных элементов СВЧ и КВЧ МИС для перечисленных типов гетероструктур на подложках GaAs и InP, а также широкозонных полупроводников AlGaIn/GaN и AlGaIn/AlN/GaN, на подложках из сапфира и карбида кремния с рабочими частотами до 100 ГГц;
- разработана технология изготовления транзисторов и МИС на базе современной электронно-лучевой литографии (нано-литографы RAITH150-TWO, NOYAGER). Она позволяет изготавливать полевые транзисторы с длиной затворов до 50 нм с максимальными частотам до 630 ГГц.

Были созданы:

- МИС для приемного модуля КВЧ-диапазона, включая МШУ КВЧ (MHEMT на GaAs), смеситель с подавлением зеркального канала, генератор, управляемый напряжением и МШУ промежуточной частоты;
- МИС усилителя мощности КВЧ-диапазона с выходной мощностью более 300 мВт (MHEMT на GaAs) и выходной мощностью более 1 Вт на основе HEMT AlGaIn/AlN/GaN на сапфировой или SiC-подложке;

- МИС диапазона частот 56–64 ГГц, включающих МШУ на основе PHEMT на подложках InP и усилитель мощности (MHEMT на GaAs) и со встроенными антеннами на HEMT AlGaN/AlN/GaN.

За последние пять лет по заказу Минобрнауки России в ИСВЧПЭ РАН в рамках ФЦП "Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники" на 2008–2015 годы были разработаны:

- базовая технология изготовления встроенных интегральных антенных элементов для диапазонов частот 5 ГГц, 10–12 ГГц (2010–2011 годы);
- базовые серийные технологии изделий микроэлектроники: систем на кристалле, в том числе в гетероинтеграции сенсорных и исполнительных элементов (СВЧ-усилители и встроенные антенны) (2011–2012 годы);
- базовые серийные технологии изделий микроэлектроники: микроэлектронных устройств различных типов (КВЧ монолитных интегральных схем на метаморфных наногетероструктурах) (2011–2012 годы).

Проведены исследования:

- по разработке базовых технологий изделий микроэлектроники (систем на кристалле, в том числе СВЧ-коммутаторов сигналов и варакторов) совместно с МИРЭА (2011–2012 годы);
- перспективных конструкций и технологических принципов формирования квантовых структур для терагерцевого диапазона частот (2012–2013 годы);
- перспективных типов сверхвысокочастотных приборов (92–96 ГГц) и технологических принципов их изготовления (2013–2015 годы).

Дальнейшее развитие научно-исследовательских и технологических работ ИСВЧПЭ РАН связано с созданием приборов и систем с рабочими частотами диапазонов 56–64 ГГц, 71–76 ГГц, 81–86 ГГц, 94–96 ГГц и 115–130 ГГц, максимально использующих заложенные природой возможности полупроводниковых гетероструктур A^{III}B^V. Кроме того, продолжатся исследования, направленные на создание приборов субмиллиметрового диапазона длин волн (200–300 ГГц и выше).

Запланировано участие ИСВЧПЭ в ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России" на 2014–2020 годы по заказу Минобрнауки России. Будут проведены:

- ПНИ "Разработка базовой технологии создания МИС усилителей мощности и маломощных усилителей на нитридных наногетероструктурах для приемопередающих модулей на частоту 8–12 ГГц" (2014–2016 годы);
- ПНИ "Разработка наногетероструктур на подложках фосфида индия для приборов СВЧ-нанoeлектроники (100–300 ГГц)" (2014–2015 годы);

- ПНИ "Разработка конструкторско-технологических решений создания МИС усилителей мощности на широкозонных полупроводниках для современной радиоаппаратуры в поддиапазоне частот 42–46 ГГц" (2014–2016 годы);
- ПНИ "Разработка конструктивно-технологических принципов создания однокристалльных приемопередающих модулей для современных широкополосных систем беспроводной связи и передачи информации в диапазоне частот 57–64 ГГц" (2014–2016 годы);
- ПНИ "Разработка МИС однокристалльных приемопередающих модулей для диапазона частот 23–25 ГГц на основе нитрида галлия" (2015–2017 годы).

Огромный объем исследований и разработок приборов и схем СВЧ-диапазона, выполненный сотрудниками ИСВЧПЭ, можно представить по приведенному в конце статьи списку статей, опубликованных только в 2015 году.

СВЧ-ТЕХНОЛОГИИ – ОСНОВА ЭЛЕКТРОНИКИ БУДУЩЕГО

В России, как и за рубежом, технологии создания изделий СВЧ-электроники относятся к категории критичных. Очевидно, что сегодня именно разработка новых материалов и развитие микроэлектронных технологий СВЧ-электроники определяют требуемые характеристики радиоэлектронной аппаратуры, а также конечных комплексов и систем. В этом состоит важная особенность современного этапа развития СВЧ-технологий.

Технологические направления развития СВЧ-электроники

Системы мобильной беспроводной связи. Голосовая сотовая связь поколения 2G (GSM, CDMA, DAMPS) сменилась (дополнилась) системами передачи данных. Затем появилось поколение 3G – сотовая телефония с возможностью скоростной передачи данных (на уровне 1 Мбит/с), 4G – WiMAX и LTE, а сегодня – системы 4G (LTE и LTE Advanced).

Интернет вещей, связь M2M, интеллектуальные производства. Расширяется сфера применения самых разных устройств сбора данных, датчиков, в частности, на основе СВЧ RFID-технологий.

СВЧ-системы радиорелейной связи. По мере развития технологий беспроводной связи возросла потребность в средствах создания беспроводных широкополосных каналов связи. Стали интенсивно развиваться системы связи E-диапазона (71–76/81–86 ГГц).

СВЧ-системы локальной передачи данных. Системы WiFi, Bluetooth и ZigBee работают в основном в диапазонах от 2,4 до 5 ГГц. Однако примерно с 2010 года начали развиваться коммерческие системы передачи данных в диапазоне 60 ГГц – системы WiGig и WirelessHD.

Системы волоконно-оптической связи. В этих системах СВЧ-технологии незаменимы для реализации протоколов класса 100Gb и 400Gb Ethernet и стандартов OTN (с агрегатной скоростью в канале на уровне 100 и 400 Гбит/с). Основные элементы оптических трансиверов – СВЧ СБИС.

Досмотровые комплексы безопасности. Рентгеновские досмотровые комплексы в аэропортах и на других объектах уступают место системам миллиметрового диапазона. Это важно с точки зрения медицинской безопасности СВЧ-сканеров, которые обладают широкими возможностями.

Автомобильные радары, системы активной безопасности. Автомобильные радары, работающие в диапазоне 77–79 ГГц – одно из направлений, которое в ближайшее время будет развиваться чрезвычайно активно.

Системы миллиметрового и субмиллиметрового (терагерцевого) диапазонов – одна из важнейших областей развития СВЧ-технологий. Можно выделить телекоммуникационные СВЧ-системы миллиметрового диапазона; беспроводные системы межсоединений для суперкомпьютеров; системы сверхвысокоскоростной ближней связи (диапазон порядка 320 ГГц); системы СВЧ-связи между компонентами на плате; СВЧ-передачу энергии на ближние и дальние расстояния; СВЧ-сенсоры и технологии, СВЧ RFID-технологии; радарные технологии; СВЧ-зрение, пассивную СВЧ-локацию; микроволновую наноскопию (наноразмерную микроскопию), аналитические ТГц-инструменты; биомедицинские приложения СВЧ; СВЧ-биосенсоры.

* * *

Институт СВЧПЭ РАН активно участвует в выполнении стратегической программы исследований технологической платформы "СВЧ-технологии", которая включена в перечень основных технологических платформ, утвержденный решениями Правительственной комиссии по высоким технологиям и инновациям, в апреле 2011 года. Ежегодно на основе предложений участников ТП формируется подробный тематический план работ и проектов ТП в сфере исследований и разработок по трем основным взаимосвязанным технологическим направлениям – электронное материаловедение, электронные СВЧ-компоненты и СВЧ-радиоприборостроение.

В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 года № 218 "О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологического производства" ИСВЧПЭ РАН выполнил ОКТР "Разработка базовой технологии

и организация высокотехнологического производства изготовления высокоэффективных теплоотводящих элементов конструкции из поликристаллического алмаза для активных компонентов изделий электронной техники" по инициативе индустриального партнера АО "НПП "Исток" им. А.И.Шокина". В апреле 2013 года Институт стал победителем IV очереди конкурса, проводимого в соответствии с постановлением № 218.

Основные работы, выполняемые ИСВЧПЭ РАН по заказу Минобрнауки России, были представлены на научно-практической конференции по итогам реализации в 2015 году прикладных научных исследований и экспериментальных разработок по приоритетным направлениям в соответствии с федеральной целевой программой "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы" в рамках III ежегодной национальной выставки-форума ВУЗПРОМЭКСПО-2015, которая проводилась 2–4 декабря 2015 года.

Сведения о публикациях Федерального государственного бюджетного учреждения науки ИСВЧПЭ РАН за 2015 год

Публикации в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus

1. **Khabibullin R.A., Yachmenev A.E., Lavrukhin D.V., Ponomarev D.S., Bugayev A.S., Maltsev P.P.** Pseudomorphic HEMT with Sn nanowires on a vicinal GaAs substrate // *Semicond. Sci. Technol.*, V. 30. 085009 (2015).
2. **Лаврухин Д.В., Ячменев А.Э., Бугаев А.С., Галиев Г.Б., Климов Е.А., Хабибуллин Р.А., Пономарев Д.С., Мальцев П.П.** Исследование оптических свойств GaAs, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии при низких температурах роста, с дельта-легированными слоями Si // *ФТП*. Т. 49. Вып. 7. С. 932–935 (2015).
3. **Галиев Г.Б., Васильевский И.С., Климов Е.А., Клочков А.Н., Лаврухин Д.В., Пушкарёв С.С., Мальцев П.П.** Особенности фотолюминесценции HEMT-наногетероструктур с составной квантовой ямой InAlAs/InGaAs/InAs/InGaAs/InAlAs // *ФТП*. 2015. Т. 49. Вып. 2. С. 241–248.
4. **Кульбачинский В.А., Овешников Л.Н., Лунин Р.А., Юзеева Н.А., Галиев Г.Б., Климов Е.А., Пушкарев С.С., Мальцев П.П.** Влияние конструкции буфера и ориентации подложки на подвижности электронов в метаморфных структурах In_{0.70}Al_{0.30}As/In_{0.76}Ga_{0.24}As/In_{0.70}Al_{0.30}As на подложках GaAs // *ФТП*. 2015. Т. 49. Вып. 7. С. 942–950.
5. **Galiev G.B., Vasil'evskii I.S., Klimov E.A., Pushkarev S.S., Klochkov A.N., Maltsev P.P., Presniakov M.Yu., Trunkin I.N., Vasiliev A.L.** Electrophysical and structural properties of the composite quantum wells In_{0.52}Al_{0.48}As/

- InxGa1-xAs/In0.52Al0.48As with ultrathin InAs inserts // Journal of Materials Research. 2015. V. 30. Is. 20. P. 3020–3025.
6. **Кульбачинский В.А., Овешников Л.Н., Лунин Р.А., Юзева Н.А., Галиев Г.Б., Климов Е.А., Мальцев П.П.** Экспериментальное определение эффективных масс и подвижностей электронов в каждой из подзон размерного квантования в квантовой яме InxGa1-xAs со вставками InAs // ФТП. 2015. Т. 49. Вып. 2. С. 204–213.
 7. **Авакянц Л.П., Боков П.Ю., Галиев Г.Б., Казаков И.П., Червяков А.В.** Оценка пространственной неоднородности гетерограниц в квантовых ямах GaAs/AlGaAs методом спектроскопии фотоотражения // ФТП. 2015. Т. 49. Вып. 9. С. 1238–1242.
 8. **Галиев Г.Б., Васильевский И.С., Климов Е.А., Клочков А.Н., Лаврухин Д.В., Пушкарёв С.С., Мальцев П.П.** Фотoluminesцентные свойства модулированно-легированных структур InxAl1-xAs/InyGa1-yAs/InxAl1-xAs с напряженными нановставками InAs и GaAs в квантовой яме // ФТП. 2015. Т. 49. Вып. 9. С. 1243–1253.
 9. **Глинский И.А., Зенченко Н.В.** Расчет теплораспределяющего элемента конструкции для мощных СВЧ-транзисторов. Микроэлектроника. Т. 44. №4. С. 269–274 (2015).
 10. **Yuzeeva N.A., Galiev G.B., Klimov E.A., Oveshnikov L.N., Lunin R.A., Kulbachinskii V.A.** Experimental determination of the subband electron effective mass in InGaAs/InAlAs NEMT-structures by the Shubnikov – de Haas effect at two temperatures // Physics Procedia. V.72. P. 425–30 (2015).
 11. **Алешин А.Н., Бугаев А.С., Ермакова М.А., Рубан О.А.** Исследование МНЕМТ гетероструктуры с каналом In0.4Ga0.6As, выращенной методом МЛЭ на подложке GaAs, с помощью построения карт обратного пространства // ФТП. Т. 49. Вып. 8. С. 1065–1070 (2015).
 12. **Лаврухин Д.В., Хабибуллин Р.А., Пономарев Д.С., Мальцев П.П.** Фотoluminesценция гетероструктур с квантовой ямой InxGa1-xAs с высоким содержанием индия при разной мощности возбуждения // ФТП. Т. 49. Вып. 9. С. 1254–1257 (2015)
 13. **Lavrukhin D.V., Yachmenev A.E., Galiev R.R., Bugaev A.S., Fedorov Y.V., Khabibullin R.A., Ponomarev D.S., Maltsev P.P.** Investigation and Fabrication of the Semiconductor Devices Based on Metamorphic InAlAs/InGaAs/InAlAs Nanoheterostructures for THz Applications // Int. J. High Speed Electronics Systems. V. 24. 1520001 [5 pages] (2015).
 14. **Melekhov A.P., Lavroukhine D.V.** The application of the temperature wave technique for investigation of the influence of the magnetic field on the acoustic properties of wafer // Physics Procedia, V. 73. P. 193–197 (2015).
 15. **Khabibullin R.A., Galiev G.B., Ponomarev D.S., Maltsev P.P.** Metamorphic Nanoheterostructures for Millimeter-Wave Electronics // Nanotechnologies in Russia. V. 10. Nos. 7–8. P. 593–599 (2015).
 16. **Громов Д.В., Мальцев П.П., Полевич С.А.** Лазерное моделирование переходных радиационных эффектов в гетероструктурных элементах на полупроводниковых соединениях AIII BV // ФТП. Т. 50. Вып. 2. С. 223–228 (2015).
 17. **Ryzhii V., Ryzhii M., Mitin V., Shur M.S., Otsuji T.** Negative terahertz conductivity in remotely doped graphene bilayer heterostructures // Journal of applied physics. V.118.183105 (2015).
- Публикации в журналах индексируемых в РИНЦ (не включены публикации из пункта 1)**
1. **Галиев Р.Р., Гнатюк Д.Л., Зуев А.В., Крапухин Д.В., Майтама М.В., Матвеев О.С., Михайлович С.В., Федоров Ю.В., Щербакова М.Ю.** Нитридные технологии для освоения миллиметрового диапазона длин волн // НМСТ. №2. С. 21–32 (2015).
 2. **Фёдоров Ю.В., Михайлович С.В.** Нитридные НЕМТ против арсенидных: последняя битва? // Известия вузов. Материалы электронной техники. Т.18. №1(69). С. 16–22 (2015).
 3. **Фёдоров Ю.В., Мальцев П.П., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л., Крапухин Д.В., Путинцев Б.Г., Павлов А.Ю., Зуев А.В.** МИС усилителей со встроенными антеннами СВЧ-диапазона на наногетероструктурах // Наноиндустрия. №3. С. 44–51.
 4. **Глинский И.А., Редькин С.В., Духновский М.П., Куликов Е.Н., Смирнова А.К., Фёдоров Ю.Ю.** Формирование нанокристаллических слоев пористого анодного оксида алюминия на высокоомной кремниевой подложке для роста поликристаллического алмаза // НМСТ. №4. С. 15–20 (2015).
 5. **Сенечкин А.П., Бугаев А.С., Ячменев А.Э.** Оптические и электрофизические свойства РНЕМТ наногетероструктур с профилем легирования в виде нанонитей из атомов олова // НМСТ. №1. С. 27–32 (2015).
 6. **Мальцев П.П., Редькин С.В., Скрипниченко А.С., Побойкина Н.В., Духновский М.П., Смирнова А.К.** Технология лазерной резки поликристаллических алмазных пластин // НМСТ. № 5. 2015. С. 44–48.
- Публикации в материалах научных мероприятий (съездов, конференций, симпозиумов, школ и т. п.)**
1. **Galiev G.B., Klochkov A.N., Vasil'evskii I.S., Klimov E.A., Lavruhin D.V., Pushkarev S.S.** Photoluminescence spectra of the modulation-doped InAlAs/InGaAs/InAlAs quantum wells with strained InAs and GaAs sublayers // Proceedings of the 23rd International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology" (Saint Petersburg, Russia, June 22–26, 2015). P. 103–104.
 2. **Galiev G.B., Grekhov M.M., Vasiliev A.L., Klimov E.A., Klochkov A.N., Vasil'evskii I.S., Lavruhin D.V.,**

- Pushkarev S.S., Trunkin I.N. Structural and photoluminescent properties of low-temperature GaAs grown on GaAs (100) and (111)A substrates // Proceedings of the 23rd International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology" (Saint Petersburg, Russia, June 22–26, 2015). P. 214–215.
3. **Галиев Г.Б., Климов Е.А., Клочков А.Н., Лаврухин Д.В., Пушкарёв С.С.** Структурные и фотолюминесцентные исследования низкотемпературного GaAs на подложках GaAs (100) и (111)A // Тезисы докладов XII Российской конференции по физике полупроводников (Ершово, 21–25 сентября 2015 г.). С. 155.
 4. **Овешников Л.Н., Кульбачинский В.А., Лунин Р.А., Юзеева Н.А., Галиев Г.Б., Пушкарёв С.С.** Влияние структуры метаморфного буфера и ориентации подложки на подвижности электронов в двумерном канале // Тезисы докладов XII Российской конференции по физике полупроводников (Ершово, 21–25 сентября 2015 г.). С. 262.
 5. **Пушкарёв С.С., Грехов М.М., Васильевский И.С., Виниченко А.Н., Коленцова О.С., Имамов Р.М., Ганин Г.В.** Диагностика кристаллической структуры метаморфных гетероструктур InAlAs/InGaAs/InAlAs методом высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии в режиме омега-сканирования // Сборник трудов VI Всероссийской молодёжной конференции по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики. – М.: РИИС ФИАН. 2015. С. 110.
 6. **Юзеева Н.А., Лунин Р.А., Галиев Г.Б., Климов Е.А., Лаврухин Д.В., Кульбачинский В.А.** Зонные диаграммы и электрофизические параметры НЕМТ-структур InGaAs/InAlAs // Сборник трудов 6-ой Международной Научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники "Моковские чтения" (Москва, 20–21 мая 2015 г.). С. 18–19.
 7. **Клочков А.Н., Галиев Г.Б., Васильевский И.С., Климов Е.А., Лаврухин Д.В., Пушкарёв С.С.** Спектр электронов и дырок в полупроводниковых гетероструктурах InGaAs/InAlAs, содержащих напряжённые вставки InAs и GaAs // Сборник трудов 6-ой Международной Научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники "Моковские чтения" (Москва, 20–21 мая 2015 г.). С. 67–68.
 8. **Пушкарёв С.С., Галиев Г.Б., Клочков А.Н., Климов Е.А., Лаврухин Д.В., Грехов М.М., Ерёмин И.С.** Структурные и фотолюминесцентные исследования низкотемпературного GaAs на подложках GaAs (100) и (111)A // Сборник трудов 6-ой Международной Научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники "Моковские чтения" (Москва, 20–21 мая 2015 г.). С. 81–82.
 9. **Пушкарёв С.С., Грехов М.М., Васильевский И.С., Виниченко А.Н., Ерёмин И.С., Коленцова О.С.** Исследование кристаллической структуры метаморфных наногетероструктур InAlAs/InGaAs/InAlAs методом рентгеновской дифрактометрии в режиме омега-сканирования // Сборник трудов 6-ой Международной Научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники "Моковские чтения" (Москва, 20–21 мая 2015 г.). С. 83–84.
 10. **Пушкарёв С.С., Васильевский И.С., Виниченко А.Н., Галиев Г.Б., Климов Е.А.** Анизотропные свойства гетероструктур (In, Ga, Al)As на подложках (100) GaAs // Труды XIX Международного симпозиума "Нанофизика и нанoeлектроника" (Нижний Новгород, 10–14 марта 2015 г.). Т. 2. С. 634–635.
 11. **Галиев Г.Б., Пушкарёв С.С., Просеков П.А., Имамов Р.М., Благов А.Е., Климов Е.А., Клочков А.Н., Лаврухин Д.В.** Характеризация НЕМТ-наногетероструктур InAlAs/InGaAs/InAlAs на подложках InP с нановставками InAs в квантовой яме // Труды XIX Международного симпозиума "Нанофизика и нанoeлектроника" (г. Нижний Новгород, 10–14 марта 2015 г.). Т. 2. С. 636–637.
 12. **Fedorov Yu.V., Mikhaylovich S.V.** Effect of Heterostructure Parameters and Fabrication Technology on the Noise Properties of AlGaIn/GaN HEMT // 10th European Microwave Integrated Circuits Conference (Paris, France, Sept 7–8, 2015). P. 144–147 (2015).
 13. **Михайлович С.В., Галиев Р.Р., Фёдоров Ю.В., Щербанова М.Ю.** Разработка технологии изготовления двухзатворных НЕМТ миллиметрового диапазона на нитридных гетероструктурах // 10-я Всероссийская конференция "Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы" (Санкт-Петербург, Россия, 23–25 марта 2015 г.). С. 143–144 (2015).
 14. **Фёдоров Ю.В., Михайлович С.В.** Анализ конструктивно-технологических требований к разработке усилителей мощности на нитридных гетероструктурах // 10-я Всероссийская конференция "Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы" (Санкт-Петербург, Россия, 23–25 марта, 2015 г.). С. 163–164 (2015).
 15. **Фёдоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Галиев Р.Р., Щербанова М.Ю., Павлов А.Ю., Михайлович С.В.** Монолитные интегральные схемы усилителей мощности W-диапазона на основе AlGaIn/AlN/GaN/SiC HEMT // 10-я Всероссийская конференция "Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы" (Санкт-Петербург, Россия, 23–25 марта 2015 г.). С. 175–176 (2015).
 16. **Фёдоров Ю.В., Гнатюк Д.Л., Бугаев А.С., Матвеев О.С., Галиев Р.Р., Зуев А.В.** Разработка многофункциональных СВЧ МИС для ППМ Ка и V-диапазонов на гетероструктурах AlGaIn/GaN и технологии их изготовления // 10-я Всероссийская конференция "Нитриды

- галлия, индия и алюминия – структуры и приборы" (Санкт-Петербург, Россия, 23–25 марта, 2015 г.). С. 137–138 (2015).
17. **Гнатюк Д.Л., Матвеев О.С.** Исследование мало-сигнальных S-параметров пассивных тестовых элементов на гетероструктурах AlGaIn/GaN в диапазоне частот до 110 ГГц // 10-я всероссийская конференция "Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы" (Санкт-Петербург, 23–25 марта, 2015). С. 173–174.
 18. **Мальцев П.П., Фёдоров Ю.В., Матвеев О.С., Гнатюк Д.Л., Павлов А.Ю., Крапучин Д.В., Путинцев Б.Г.** Монолитные интегральные схемы со встроенными антеннами для V-диапазона на наногетероструктурах AlGaIn/GaN // Международная конференция "Микроэлектроника 2015" (Алушта, 28 сентября – 3 октября 2015 г.). С. 203–205.
 19. **Гнатюк Д.Л., Фёдоров Ю.В., Зуев А.В., Майтама М.В., Матвеев О.С., Крапучин Д.В.** Опыт проектирования СВЧ МИС миллиметрового диапазона длин волн в ИСВЧПЭ РАН // XIV научно-техническая конференция "Твердотельная электроника, сложные функциональные блоки РЭА" (Москва, 2015 г.). С. 129–130.
 20. **Рубан О.А., Алешин А.Н., Бугаев А.С., Ермакова М.А.** Исследование МНЕМТ гетероструктуры с каналом In_{0.4}Ga_{0.6}As, выращенной методом МЛЭ на подложке GaAs, с помощью построения карт обратного пространства // Сборник трудов 6-й Международной научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электронике "Мокеровские чтения" (Москва, Россия, 20–21 мая, 2015 г.). С. 85–86 (2015).
 21. **Алешин А.Н., Рубан О.А.** Структурная аттестация элементов гетероструктуры с квантовой ямой In_{0.4}Ga_{0.6}As, выращенной методом молекулярно-лучевой эпитаксии, на основе построения карт обратного пространства // Сборник трудов V Российско-Японского научно-технического Семинара "Современные методы исследования структуры материалов и их применение в материаловедении" (Москва, Россия, 8–9 октября, 2015 г.). С. 36–38 (2015).
 22. **Рубан О.А., Юзеева Н.А.** Исследование поляризации в гетероструктурах на основе GaN методом вольт-фарадных характеристик // Сборник аннотаций 13-й Курчатовской молодежной научной школы (Москва, Россия, 27–30 октября 2015 г.). С. 137 (2015).
 23. **Кагирина К.А., Лаврухин Д.В., Мальцев П.П., Рубан О.А.** Испытания на надежность монолитных интегральных схем КВЧ - диапазона с помощью автоматизированного модульного комплекса // Сборник тезисов докладов Российской научно-технической конференции "СЕРТИФИКАЦИЯ ЭКБ-2015" (Санкт-Петербург, Россия, 1–3 апреля 2015 г.).
 24. **Фёдоров Ю.В., Кагирина К.А., Лаврухин Д.В., Гнатюк Д.Л., Зуев А.В., Рубан О.А.** Анализ устойчивости ПС СВЧ диапазона к воздействию внешних факторов // Сборник тезисов Международной конференции "Микроэлектроника 2015" (Алушта, Россия, 28 сентября – 3 октября, 2015 г.). С. 208–210 (2015).
 25. **Кагирина К.А., Марфин В.А.** Расширение аппаратно-программного комплекса для исследования радиационной стойкости сложно-функциональных СБИС прибором реконфигурируемого ввода/вывода // Сборник тезисов XVIII Международной телекоммуникационной конференции молодых ученых и студентов "Молодежь и наука" (Москва, Россия, январь–февраль 2015 г.). С. 104–105 (2015).
 26. **Marfin V.A., Nekrasov P.V., Kalashnikov O.A., Kagirina K.A.** Using Modules NI PXI-7841R Rapid I/O Module for the Functional Control of the Microprocessors // International Siberian Conference on Control and Communications – SIBCON (Omsk, Russia, 21–23 May, 2015). DOI 10.1109/SIBCON.2015.7147142, 5 pages.
 27. **Арутюнян С.С., Томош К.Н.** Формирование диэлектрической маски для селективного роста p+GaIn в технологии невжигаемых омических контактов к структурам AlGaIn/GaN // Сборник трудов 6-ой Международной Научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электронике "Мокеровские чтения" (Москва, 20–21 мая 2015 г.).
 28. **Щаврук Н.В., Мальцев П.П., Трофимов А.А., Кондратенко В.С., Зобов А.К.** Разделение сапфировой пластины толщиной выше 300 мкм на кристаллы // Сборник трудов 6-ой Международной Научно-практической конференции по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электронике "Мокеровские чтения" (Москва, 20–21 мая 2015 г.).
 29. **Фёдоров Ю.В., Павлов А.Ю., Павлов В.Ю., Иванова Н.Е., Арутюнян С.С., Томош К.Н., Михалев А.О.** Разработка базовой технологии создания монолитных интегральных схем усилителей мощности и маломощных усилителей на нитридных наногетероструктурах для приемо-передающих модулей // Материалы международной научно-технической конференции, 1–5 декабря 2015 г., INTERMATIC – 2015, часть 4, с. 240–243.
 30. **Щаврук Н.В., Трофимов А.А., Иванова Н.Е., Михалев А.О.** Разработка базовой технологии разделения пластин карбида кремния на кристаллы методом дисковой резки // Материалы международной научно-технической конференции, 1–5 декабря 2015 г., INTERMATIC – 2015, часть 4.