

# Развитие технологий СВЧ электроники в ИСВЧПЭ РАН на современном этапе

Д.Л. Гнатюк, А.С. Бугаев, Р.Р. Галиев, С.А. Гамкрелидзе, Е.Н. Енюшкина, А.В. Зуев, И.А. Ивченко, Д.В. Лаврухин, П.П. Мальцев, О.С. Матвеев, А.Ю. Павлов, В.Ю. Павлов, К. Н. Томош

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН

**Аннотация:** в работе описываются основные возможности и достижения ИСВЧПЭ РАН в части разработки технологий изготовления ЭКБ СВЧ диапазона частот. В институте реализован полный цикл создания отечественной ЭКБ, начиная от проектирования под собственную технологическую линейку, и заканчивая изготовлением готовых образцов. Технологическая линейка института позволяет изготавливать продукцию малыми партиями.

**Ключевые слова:** Монолитные интегральные схемы, GaAs, GaN, СВЧ диапазон

## 1. Введение

ИСВЧПЭ РАН был основан как самостоятельная организация в 2002 году член-корреспондентом РАН В.Г. Мокеровым на базе лаборатории ИРЭ РАН.

Главной целью Института является проведение фундаментальных и прикладных научных исследований и прикладных разработок в области сверхвысокочастотной (СВЧ) и крайне высокочастотной (КВЧ) полупроводниковой электроники.

Одним из основных направлений деятельности ИСВЧПЭ РАН является разработка технологий изготовления СВЧ транзисторов и монолитных интегральных схем (МИС), проектирование МИС под собственную технологическую линейку и их опытное изготовление и исследование. Технологическая линейка института относится к классу R&D (исследования и разработки) с производительностью порядка 10-15 пластин в год. Оборудование позволяет работать с подложками диаметром до 100 мм.

## 2. Разработки ЭКБ СВЧ диапазона частот

Первоначально деятельность ИСВЧПЭ РАН была связана с гетероструктурами арсенида галлия (GaAs). В институте имеется собственный участок эпитаксиального роста на подложках GaAs. Это позволяет оптимизировать псевдоморфные и метаморфные гетероструктуры под конкретную область применения. Транзисторы с грибообразными затворами на базе метаморфных гетероструктур показали рекордные для института величины предельной частоты усиления по мощности  $F_{max} = 630$  ГГц и предельной частоты усиления по току  $F_t = 130$  ГГц. Транзисторы на базе псевдоморфных гетероструктур показали рекордные для института величины  $F_{max} = 165$  ГГц и  $F_t = 106$  ГГц. На базе полученных гетероструктурных транзисторов были разработаны и изготовлены монолитные интегральные схемы диапазонов частот до 40 ГГц. Среди них широкополосные усилители P, L, S – диапазонов с коэффициентом усиления ( $K_y$ ) более 16 дБ и коэффициентом шума ( $K_{ш}$ ) менее 2 дБ, усилители С-Х – диапазона с  $K_y$  более 20 дБ и  $K_{ш}$  1,5 – 2,5 дБ, первые в России МИС широкополосных усилителей Ka-диапазона с  $K_y$  16 – 20 дБ и  $K_{ш}$  3 – 4 дБ в диапазоне частот 26 – 40 ГГц (рисунок 1) ([1, 2]).

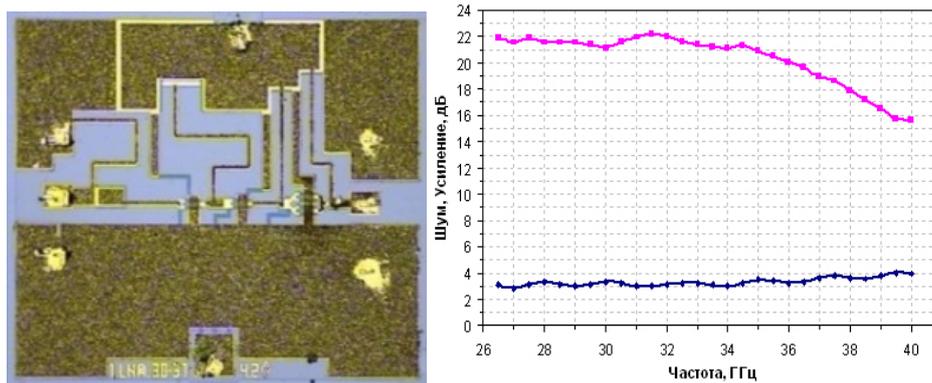


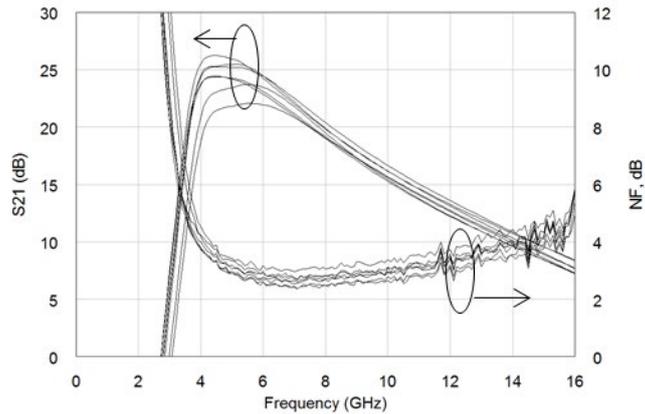
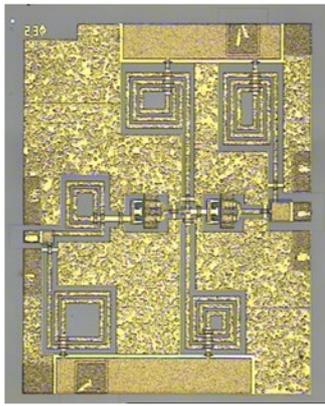
Рисунок 1. Фотография и измеренные  $K$ , и  $K_{ш}$  МИС МШУ GaAs p-HEMT.

Позднее ИСВЧПЭ РАН приступил к освоению технологий изготовления СВЧ транзисторов и МИС на основе гетероструктур нитрида галлия (GaN). Исходными структурами являются любые типы гетероструктур на основе нитридов элементов третьей группы с квазидвумерным электронным газом (HEMT-структуры), выращенные на подложках сапфира, карбида кремния, высокоомного кремния. Нами применяются коммерчески доступные гетероструктурные подложки. В большинстве случаев нами использовались гетероструктурные подложки сапфира производства ЗАО «Элма-Малахит».

Базовая технология, разработанная в нашем институте, обеспечивает для транзисторов  $f_t=70$  ГГц и  $f_{max} >100$  ГГц при базовой длине затвора  $\sim 0,15$  мкм. Омические контакты истока и стока изготавливаются по технологии селективного эпитаксиального доращивания (SAG – selectively area growth) контактного слоя GaN и являются невжигаемыми. Эпитаксиальное доращивание контактного слоя GaN выполняется на аммиачной нитридной установке молекулярно-лучевой эпитаксии (в НИЦ «Курчатовский институт»). Удельное контактное сопротивление составляет  $0,3$  Ом·мм.

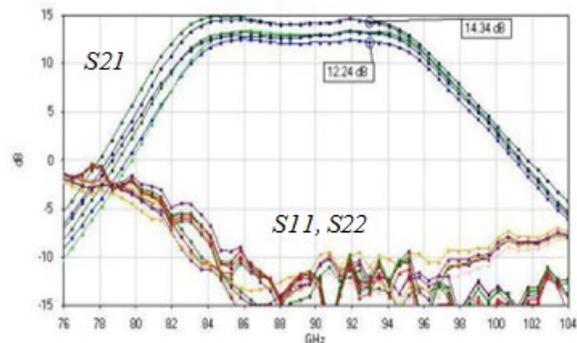
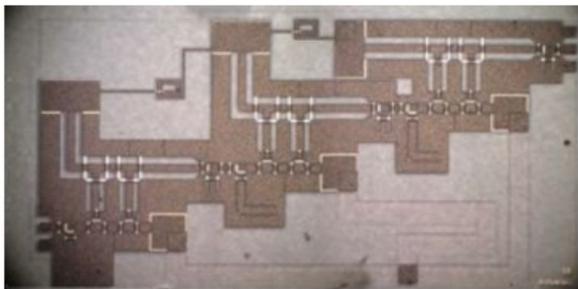
Базовым вариантом конструктивного исполнения МИС является копланарный вариант линий передачи. При использовании GaN-HEMT структур на подложках кремния возможен микрополосковый вариант со сквозными отверстиями при толщине утоненной подложки не более 50 мкм.

Ввиду невозможности изготовления сквозных отверстий в сапфире и технологической сложности в карбиде кремния в ИСВЧПЭ РАН было реализовано конструкторско-технологическое решение по созданию «заземляющей плоскости» над лицевой поверхностью пластины с уже изготовленными активными и пассивными СВЧ элементами поверх слоя полимерного диэлектрика (фотолак разработки Института высокомолекулярных соединений РАН). При этом заземление соответствующих элементов производится через отверстия в слое фотолака, одновременно выполняющего роль защитной пассивации. Применение фотолака не требует специального оборудования. Работа с ним осуществляется на стандартных литографических установках, что при необходимости упрощает внедрения данной технологии на отечественных предприятиях промышленности [3].



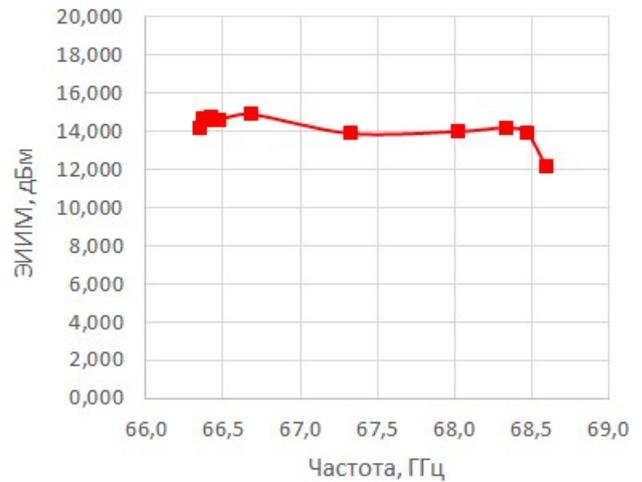
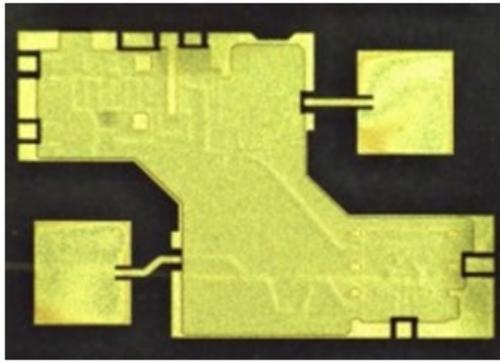
**Рисунок 2.** Фотография и измеренные  $K_y$  и  $K_{ш}$  МИС МШУ С-Х диапазона.

Среди разработок института на GaN можно отметить усилитель мощности (УМ) диапазона 1-2 ГГц с выходной мощностью 8 Вт в импульсном режиме, усилитель средней мощности 25-40 ГГц с выходной мощностью 0,3 – 0,5 Вт в импульсном режиме. Широкополосный малошумящий усилитель (МШУ) С-Х – диапазона имеет  $K_y$  более 15 дБ,  $K_{ш}$  2,5 – 3,0 дБ и линейную выходную мощность 15 – 17 дБм (рисунок 2). Усилитель диапазона частот 57 – 64 ГГц в зависимости от рабочей точки может функционировать как МШУ с  $K_y$  более 16 дБ и  $K_{ш}$  6 дБ или как УМ с выходной мощностью насыщения 100 мВт в импульсном режиме. Все эти усилители были реализованы на подложках сапфира. Наиболее высокочастотной разработкой института является широкополосный усилитель мощности диапазона частот 85 – 95 ГГц на карбиде кремния, имеющий  $K_y$  более 10 дБ и непрерывную насыщенную мощность 100 мВт (рисунок 3) [4].



**Рисунок 3.** Фотография и измеренные S-параметры усилителя мощности GaN/SiC диапазона частот 85 – 95 ГГц.

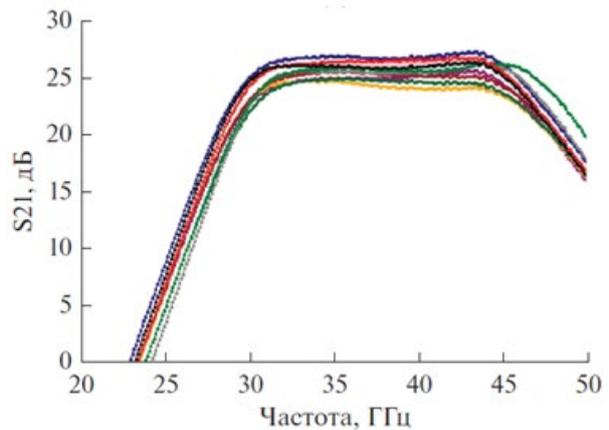
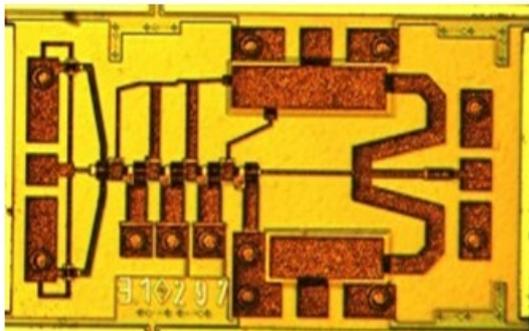
Помимо отдельных усилителей разрабатывались комплекты (ГУН, смеситель, усилитель) на подложках сапфира для реализации функций приема-передачи сигнала диапазонов частот 20, 30, 60 ГГц [5, 6]. Благодаря малому размеру длины волны в диапазоне 60 ГГц были реализованы однокристалльные приемо-передающие преобразователи сигнала со встроенными приемной и передающей антеннами. Эквивалентная изотропно излучаемая мощность полученных образцов после монтажа в герметичный металлокерамический корпус составляет более 10 дБм (рисунок 4). Насколько нам известно, подобные преобразователи сигнала диапазона частот 60 ГГц на гетероструктурах нитрида галлия на сапфире были изготовлены впервые в мире.



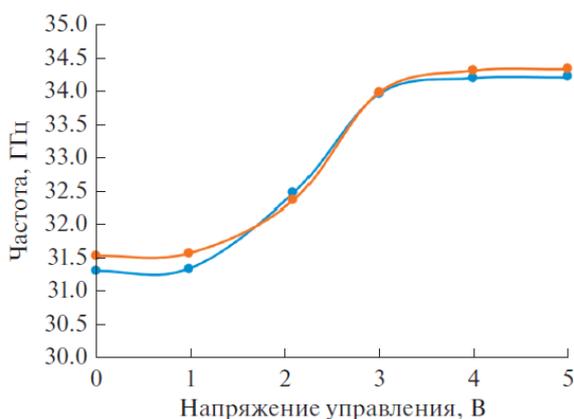
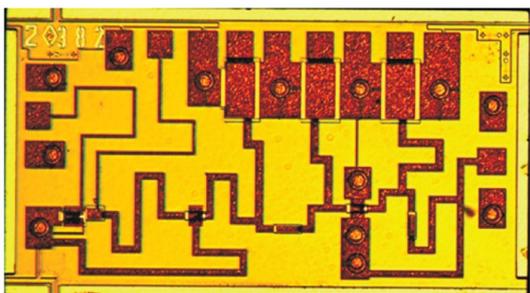
**Рисунок 4.** Фотография однокристалльного прямо-передающего преобразователя сигнала со встроенными антеннами и измеренные значения эквивалентной изотропно излучаемой мощности образца в герметичном корпусе.

В 2017 году в ИСВЧПЭ РАН впервые в России были разработаны и изготовлены МИС МШУ и МИС ГУН на гетероструктуре GaN на подложке кремния. МИС МШУ в диапазоне частот 30 – 45 ГГц имеет  $K_u$  более 20 дБ при  $K_{in}$  5 дБ. МИС ГУН имеет диапазон перестроения не менее 2 ГГц в пределах диапазона частот 31 – 34 ГГц с выходной мощностью 15 дБм (рисунки 5 – 6) [7].

В последние годы для ряда МИС диапазонов частот от 1 до 70 ГГц были проработаны различные способы монтажа кристаллов, включая методы прямого и обратного монтажа (флип-чип) и монтаж в корпус. При этом использовались отечественные корпуса производства АО «НИИПП» г. Томск, предназначенные для работы в диапазоне частот до 40 ГГц. Сборка образцов выполнялась с помощью ГЗ «Пульсар», АО «НПП «Пульсар», АО «ЗНТЦ», АО «Миландр».



**Рисунок 5.** Фотография и измеренные АЧХ МИС МШУ GaN/Si.



**Рисунок 6.** Фотография и измеренный диапазон перестроения МИС ГУН GaN/Si

Возможна организация мелкосерийного выпуска разработанных МИС на технологической линии ИСВЧПЭ РАН.

#### 4. Заключение

ИСВЧПЭ РАН имеет двадцатилетний опыт и возможности для отработки и совершенствования технологических процессов, создания новых конструктивно-технологических решений, разработки и опытного или мелкосерийного производства СВЧ МИС на GaAs и GaN в диапазоне частот вплоть до 100 ГГц.

#### Список литературы

1. Ю. В. Федоров и др. НЕМТ транзистор на гетероструктурах  $\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}/\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}/\text{InP}$  с предельной частотой усиления по мощности до 323 ГГц // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2010. - часть 1. - №2 (22).
2. Гнатюк Д.Л. и др. Монолитные интегральные схемы малошумящих усилителей КВЧ диапазона на GaAs рНЕМТ гетероструктурах // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2010. - часть 1. - №2 (22).
3. Ю. В. Федоров и др. Технология изготовления и разработка монолитных интегральных схем на основе нитрида галлия // Нано- и микросистемная техника. – 2017. – Т. 9. – № 5.
4. Ю. В. Федоров и др. Разработка монолитных интегральных схем для Ka-, V- и W-диапазонов на основе нитрида галлия // Микроэлектроника. – 2016. – Т. 45. – № 2.
5. Гнатюк Д.Л. На пути к созданию отечественных приемо- передающих модулей v-диапазона на гетероструктурах нитрида галлия // Электроника и микроэлектроника СВЧ. - 2019. - Т. 1.- № 1.
6. Матвеев О.С. и др. Радиационнстойкие монолитные интегральные схемы на основе нитрида галлия для РЛС экстремальной робототехники К-диапазона частот // Экстремальная робототехника. – 2021. – Т. 1. – № 1.
7. Ю. В. Федоров и др. Монолитные интегральные схемы Ku и Ka диапазонов длин волн на основе нитрида галлия на подложках кремния // Микроэлектроника. – 2021. – Т. 50. – № 3.