

Радиоэлектроника СВЧ – движение вперед

Научно-техническая конференция «РЭСВЧ-2024»

Часть 1

А. Кищинский¹, В. Миннебаев²

УДК 621.37.38 | ВАК 2.2.2

3–4 декабря 2024 года в Москве состоялась научно-техническая конференция «Радиоэлектроника СВЧ – технологии, компоненты, приборы, комплексы», посвященная 20-летию АО «Микроволновые системы». Целью НТК «РЭСВЧ-2024» является осуществление обмена опытом и налаживание прямого взаимодействия между руководителями, учеными, специалистами радиоэлектронной промышленности, представителями дизайн-центров, вузовской и академической науки в решении задачи развития в России промышленных технологий разработки и производства радиоэлектронных систем на основе твердотельных полупроводниковых приборов, начиная от технологий изготовления СВЧ ЭКБ до производства приборов и комплексов. Особое внимание уделено повышению качества и технического уровня разрабатываемых компонентов, модулей, приборов и радиотехнических систем.

Научно-техническая конференция «РЭСВЧ-2024» является развитием тематических семинаров-совещаний, проводимых АО «Микроволновые системы» начиная с 2012 года. Круг вопросов, обсуждаемых в рамках мероприятия, достаточно широк: от создания полупроводниковых гетероэпитаксиальных структур, разработки ростовых и пост-ростовых технологий, оборудования для их производства – до особенностей проектирования, изготовления, испытания и эксплуатации радиолокационной, связной и другой аппаратуры СВЧ-диапазона на основе полупроводниковой ЭКБ.

В течение двух дней на шести заседаниях, включая пленарное заседание и пять рабочих секций, проходивших в очном режиме в конгресс-центре гостиничного комплекса «Измайлово», были заслушаны и обсуждены 63 доклада специалистов, представлявших 37 предприятий и организаций. Всего в мероприятии приняли участие 332 специалиста, в том числе 102 кандидата и доктора наук,

представляющих 116 предприятий и организаций из 25 городов Российской Федерации и Беларуси.

Открыл НТК «РЭСВЧ-2024» и пленарное заседание **Сергей Алексеевич Исаев**, генеральный директор АО «Микроволновые системы», рассказавший об истории создания, основных вехах 20-летнего пути развития предприятия, его ключевых достижениях и планах. Особое внимание и слова благодарности были обращены к личностям, организовывавшим и поддерживавшим предприятие на разных этапах его деятельности и, прежде всего, Евгению Сергеевичу Качанову (1938–2018), директору ФГУП «КНИРТИ» с 1989 по 2012 год.

Андрей Александрович Кищинский, главный конструктор АО «Микроволновые системы», доложил о развитии тематических направлений предприятия в истекшем 20-летию и о планах на будущее. В докладе освещены 16 тематических направлений, истории их создания, становления, а также основные параметры серийно выпускаемых изделий. Отдельное внимание уделено новым тематикам активно развивающихся обособленных подразделений в Нижнем Новгороде, Саратове и Санкт-Петербурге. Отмечена научная деятельность сотрудников в рамках проведения регулярных внутренних научно-технических семинаров, участия в российских и международных конференциях и патентования научных результатов.

¹ АО «Микроволновые системы», заместитель генерального директора – главный конструктор, ak@mwsystems.ru.

² АО «Микроволновые системы», заместитель генерального директора по развитию ЭКБ, vm@mwsystems.ru

Вадим Минхатович Миннебаев, заместитель генерального директора по развитию ЭКБ АО «Микроволновые системы», посвятил свой доклад «Надежность GaN-приборов – миф или реальность?», опирающийся на многолетние исследования российских и зарубежных специалистов широкозонной полупроводниковой СВЧ-электроники, описанию механизмов деградации GaN HEMT (электрических, тепловых и механических), условиям их возникновения, характеру взаимодействия механизмов между собой (на основе визуального представления в виде «волшебного» треугольника взаимодействий) и путям купирования возможностей проявления деградационных явлений на различных этапах проектирования, изготовления и эксплуатации нитрид-галлиевой СВЧ ЭКБ.

Евгений Матвеевич Савченко, председатель рабочей группы по СВЧ-электронике Совета по развитию электронной промышленности Минпромторга России, доложил о работе экспертного сообщества в 2023–2024 гг. в части анализа более 500 научно-технических направлений развития СВЧ-электроники, мерах организационной поддержки радиоэлектронной промышленности, концепции формирования НИОКТР от разработки типовых технологических процессов до контрактного производства, включая вопросы организационного взаимодействия «РАН-ВУЗ-ЦП-фабрика» текущих и планируемых к постановке до 2030 года НИОКТР по технологиям на GaAs ГБТ, GaN/SiC, GaN/Si, SiGe БикМОП и др.

Далее работа НТК «РЭСВЧ-2024» разделилась по секциям. Доклады **секции 1** были посвящены современным технологиям изготовления СВЧ-транзисторов и МИС.

Евгений Викторович Луценко, заведующий Центром «Широкозонная нано- и микроэлектроника» Института физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, доложил о том, что применение сверхвысокотемпературного MOCVD-роста зародышевых слоев AlN на подложках SiC позволяет добиться локализации дефектов всего лишь в двух монослоях гетероинтерфейса AlN/SiC, что обеспечивает низкое тепловое сопротивление этого гетероинтерфейса [1]. Дальнейший рост непосредственно канального слоя GaN на таком тонком напряженном зародышевом слое AlN (безбуферная гетероструктура) без использования толстых буферных слоев (AlN, AlGaIn, GaN:C, GaN:Fe) позволяет получить сверхнизкое тепловое сопротивление СВЧ-транзистора за счет приближения канала тепловыделения к подложке, имеющей высокую теплопроводность, а также избежать эффектов, связанных с зарядовыми состояниями ловушек глубоких центров, образованных примесями углерода и железа. Применение данной технологии (QuanFINE) позволяет увеличить на порядок время жизни, на 25% плотность мощности, на 10% эффективность; снизить на 50% тепловое сопротивление, на 1000% эффект памяти и на 50% коллапс

тока транзистора; получить лучшую линейность в данном классе транзисторов [2, 3].

В Институте физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси были отработаны технологии создания тонких (40 нм) зародышевых слоев AlN с низкой концентрацией дислокаций порядка 10^9 см^{-2} и шероховатостью поверхности менее 0,2 нм методами молекулярно-пучковой эпитаксии. Показано, что электрические характеристики двумерного газа транзисторных гетероструктур AlGaIn/GaN, выращенных на тонких зародышевых слоях AlN, значительно превышают характеристики гетероструктур, выращенных на слоях AlN толщиной 300 нм, что, по-видимому, обусловлено механическими напряжениями тонких слоев AlN. Оптимизированы технологии роста канального слоя GaN и барьерных слоев AlN и AlGaIn-гетероструктур. На безбуферных гетероструктурах с толщиной канала GaN 600 нм получены следующие характеристики двумерного электронного газа: $n = 1,13 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $\mu = 2000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ для $\text{Al}_{0,22}\text{Ga}_{0,78}\text{N}$; $n = 1,22 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $\mu = 1940 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ для $\text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{N}$; $n = 1,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $\mu = 1820 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ (слоевое сопротивление менее 250 Ом/кв) для $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N}$, которые близки к значениям стандартных гетероструктур AlGaIn/GaN HEMT, выращенных на подложках SiC. Для безбуферных гетероструктур с толщиной канала GaN 300 нм получен лучший результат $n = 1,19 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $\mu = 1840 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ для $\text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{N}$. В докладе показаны перспективы применения молекулярно-пучковой эпитаксии для формирования безбуферных AlGaIn/GaN-гетероструктур транзисторов с высокой подвижностью электронов и приведены характеристики транзисторов, полученных на таких гетероструктурах.

Андрей Федорович Цацуньников, и. о. директора НТЦ микроэлектроники РАН, рассказал о разработке семейства установок газовой эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС), обеспечивающих выращивание гетероструктур на основе нитрида галлия (III-N-гетероструктуры) на подложках различного типа (сапфир, карбид кремния и кремний) диаметром до 200 мм для изготовления различных типов приборных гетероструктур, включая СВЧ- и силовые транзисторы. Авторы изучили эпитаксиальный рост гетероструктур с барьерными слоями AlGaIn высокого состава (до 50%) и толщиной 3–10 нм методом ГФЭ на подложках Si (111) диаметром до 76 мм. Получены транзисторные структуры с концентрацией электронов в двумерном канале более $1,7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. На этих гетероструктурах в АО «НПП „Исток“ им. А. И. Шокина» были изготовлены тестовые СВЧ-транзисторы с $I_{\text{НАС}} \geq 1400 \text{ мА/мм}$ и $S \geq 600 \text{ мСм/мм}$. Разработана технология роста нормально-открытых AlGaIn/GaN HEMT-структур на подложках кремния диаметром до 150 мм. На гетероструктурах AlGaIn/GaN в МИЭТ созданы СВЧ-транзисторы с $P_{\text{ВЫХ}} \geq 5 \text{ Вт/мм}$ (28 В), КПД > 60% (1 ГГц) и $S = 320 \text{ мСм/мм}$. Выращены прототипы AlGaIn/GaN-гетероструктур для

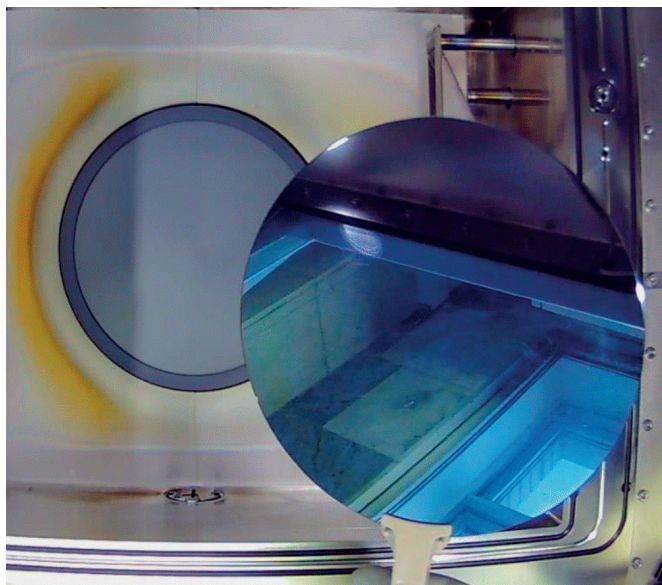


Рис. 1. AlGaIn/GaN-гетероструктура для HEMT-транзисторов на подложках кремния диаметром 200 мм

HEMT-транзисторов на подложках кремния диаметром 200 мм (рис. 1) со следующими электрофизическими параметрами: подвижность электронов $1500\text{--}1600\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, концентрация электронов $(1,1\text{--}1,2)\cdot 10^{13}\text{ см}^{-2}$.

Юрий Николаевич Свешников, главный научный сотрудник АО «Элма-Малахит», в своем докладе проанализировал расчетные и опубликованные экспериментальные результаты для различных видов гетеропереходов в структурах нитридных соединений GaAlN/GaN, InAlN/GaN, ScAlN/GaN и других, показав, что практически достигаемая плотность носителей заряда двумерного электронного газа (ДЭГ) в получаемых гетероструктурах может достигать до $(3\text{--}4)\cdot 10^{13}\text{ см}^{-2}$, что хотя и ниже теоретически предсказываемой величины $7\cdot 10^{13}\text{ см}^{-2}$, но заметно выше, чем в используемых в мировой промышленности гетероструктурах на основе GaAlN/GaN, где это значение не превышает $1,4\cdot 10^{13}\text{ см}^{-2}$. Представлены результаты исследований по получению структур на основе гетероперехода AlGaIn/AlN/GaN с целью достижения максимальной плотности носителей заряда в ДЭГ и толщиной барьерного слоя, не превышающей 8 нм. Показано, что при соответствующем выборе содержания Al в барьерном слое AlGaIn, его толщины, а также толщины спейсера AlN достигается плотность носителей заряда более $1,88\cdot 10^{13}\text{ см}^{-2}$, при их подвижности на уровне $1\cdot 10^3\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. В докладе обсуждаются вопросы технологии изготовления гетероструктур, измерения их параметров и возникающие при этом проблемы, а также приводятся результаты, полученные при создании СВЧ-приборов и схем. На тестовых транзисторах с $W_3 = 0,25\text{ мкм}$ максимальная плотность тока

достигала $1,6\text{ А/мм}$, а удельная крутизна – 400 мСм/мм , что является весьма обнадеживающим результатом, стимулирующим дальнейшее развитие технологии подобных гетероструктур.

Александр Вадимович Добров, инженер АО «НПП „Исток“ им. А. И. Шокина», в своем докладе представил технологию изготовления GaN HEMT-приборов с применением селективного эпитаксиального роста сильнолегированных слоев GaN, реализованную на предприятии. В ходе работ были успешно освоены следующие процессы: формирование несплавных омических контактов к GaN HEMT со значениями контактного удельного сопротивления менее $0,15\text{ Ом}\cdot\text{мм}$; создание Т-образного затвора длиной $0,25\text{ мкм}$ со смещенной шляпой, выполняющей функцию полевого электрода; разработка двух типов тонкопленочных конденсаторов 50 пФ/мм^2 и 400 пФ/мм^2 , широкого набора индуктивностей и сопротивлений; формирование межсоединений с применением гальванического метода; утонение Si и SiC-подложек до 100 мкм и травление сквозных отверстий для формирования заземляющего контакта. Параметры опытных мощных дискретных СВЧ-транзисторов (рис. 2) на частоте 12 ГГц : $P_{\text{ВЫХ}} = 4,5\text{ Вт/мм}$, $K_{\gamma} = 15\text{ дБ}$ при КПД = 48 %.

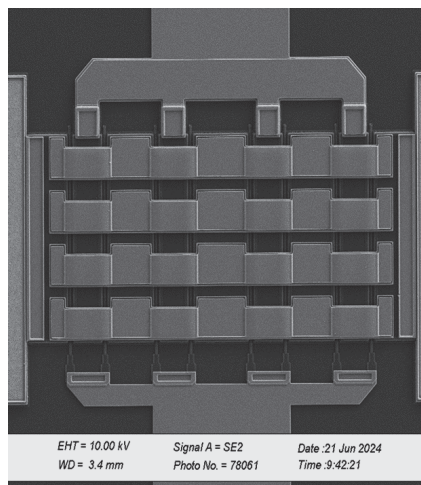


Рис. 2. Фотография опытного образца мощного дискретного GaN HEMT-транзистора X-диапазона частот

Павел Романович Машевич, заместитель директора по инновационному развитию ЦКП «МСТ и ЭКБ» НИУ МИЭТ, доложил о состоянии разработки типовых технологических процессов (ТПП) GaN/Si с проектными нормами до $0,25\text{ мкм}$ для СВЧ МИС и силовых приборов. Представлены значения параметров, измеренных на тестовых структурах параметрического монитора ТПП и ТПП-С, библиотечные элементы КИП, топологии и результаты изготовления первых экспериментальных образцов демонстраторов технологических процессов, включая параметрические мониторы, библиотечные элементы, а также СВЧ-транзисторы, усилители мощности и пассивные компоненты.

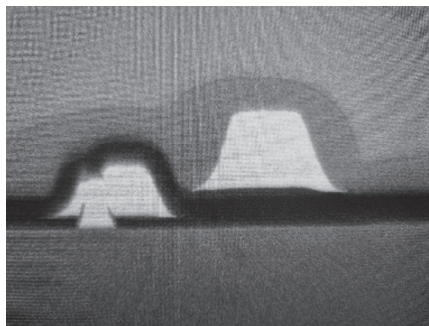


Рис. 3.
Конструкции
полевого
электрода
стока GaN HEMT
на GaN/Si

Максим Леонидович Занавескин, начальник отдела НИЦ «Курчатовский институт», рассказал о создании производства по типу foundry СВЧ-транзисторов и МИС по технологии GaN/Si с топологической нормой 0,25 мкм для обеспечения чипами отечественных разработчиков СВЧ-модулей. В докладе освещаются детали разработки технологии GaN/Si дискретных транзисторов и МИС. Технологический процесс GH025D базируется на использовании гетероструктур на основе GaN, выращенных на подложках высокоомного кремния диаметром 100 мм в НТЦ микроэлектроники РАН. Приводятся результаты оптимизации конструкций гетероструктур и транзисторов, включая формирование полевого электрода стока (рис. 3) для снижения напряженности поля в области затвор-сток, увеличения пробивного и рабочего напряжения, увеличения срока службы, уменьшения коллапса тока, повышения коэффициента усиления по мощности и снижения паразитной проходной емкости C_{gd} . Показаны основные характеристики параметрических модулей разрабатываемой технологии в сравнении с зарубежными аналогами, а также параметры транзистора с шириной затвора $W_3 = 720$ мкм на частоте 6 ГГц в импульсном режиме: $I_{СИ,МАКС} = 950$ мА/мм, $P_{-3дБ} = 5,3$ Вт/мм при $V_{СИ} = 30$ В, $P_{-3дБ} = 8,9$ Вт/мм при $V_{СИ} = 40$ В, $P_{-3дБ} = 11,5$ Вт/мм при $V_{СИ} = 50$ В.

Максим Викторович Драгуть, начальник группы разработки МИС АО «ОКБ-Планета», представил результаты разработки и модификации GaAs-технологических процессов для производства MESFET, pHEMT, МИС и пассивных устройств (IPD). В части СВЧ IPD показаны преимущества их применения при разработке и изготовлении блоков и узлов РЭА и СВЧ ЭКБ, а также результаты изготовления ряда фиксированных чип-аттенуаторов с величинами вносимых ослаблений: 0 дБ, 2 дБ, 3 дБ, 6 дБ, 10 дБ, 15 дБ, 20 дБ ($P_{вх} \leq 500$ мВт) в диапазоне рабочих частот до 40 ГГц. Описывая результаты модификации технологии СВЧ МИС на основе гетероструктур GaAs с топологической нормой 1 мкм, предназначенных, в основном, для использования в дециметровом диапазоне, докладчик уделил внимание разработке дизайна исходных гетероэпитаксиальных структур, построению технологического процесса изготовления pHEMT-транзисторов с самосовмещенным

затвором, проектированию топологии и конструкции усилительных и ключевых pHEMT-транзисторов и пассивных элементов. Представлены параметры усилительных ($f_t \geq 18$ ГГц, $f_{max} = 30$ ГГц, $S \geq 200$ мСм/мм и переключательных ($R_{on} \leq 2,5$ Ом·мм, $C_{off} \leq 0,22$ пФ/мм) транзисторов. Результаты разработки дискретных СВЧ MESFET и pHEMT на основе эпитаксиальных структур GaAs следующие: pHEMT в корпусе SOT-89 ($P_{ВЫХ} > 500$ мВт, $\Delta F_{РАБ} = 0,1-2,4$ ГГц

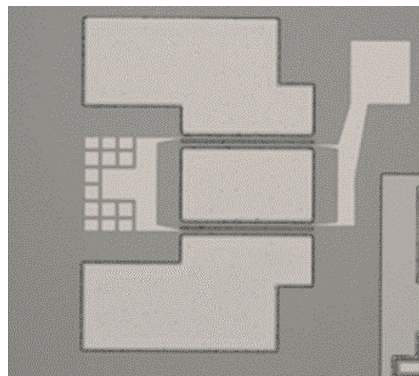


Рис. 4.
Двухзатворный
GaAs pHEMT
X-диапазона

при $Z_{ВХ/ВЫХ} = 50$ Ом); малошумящий MESFET в корпусе SOT-89 ($K_{ш} \leq 0,2$ дБ, $K_{ур} \geq 17$ дБ на $f_{РАБ} = 0,5$ ГГц); двухзатворный pHEMT X-диапазона (рис. 4) в металлокерамическом корпусе ($K_{ш} \leq 2,0$ дБ, $K_{ур} \geq 15$ дБ).

Павел Алексеевич Дюканов, руководитель проектов АО «ДЦ „Кристал”», рассказал о разработках кремниевой ЭКБ и системных решений на ее основе, включая серии из более двух десятков аналоговых и цифровых микросхем, программно-аппаратных комплексов и заказных СнК. Также уделено внимание новым, разработанным предприятием КНИ-технологиям «кремний на сапфире» и «кремний на оксиде» для производства фотоэлементов с обратной засветкой, цифро-аналоговых схем до 3,0 ГГц, МИС-памяти, логарифмических усилителей с $F_{РАБ}$ до 500 МГц, регулируемых усилителей с $F_{РАБ}$ до 150 МГц, детекторов с $F_{РАБ}$ до 1000 МГц и компараторов с $\tau_{зд}$ до 2 нс.

Доклад **Владимира Владимировича Чистякова**, ведущего инженера НИУ «МЭИ», был посвящен влиянию ловушек в $Al_xGa_{1-x}/GaN/Al_yGa_{1-y}$ гетероструктурах на работоспособность высоковольтных HEMT. В выступлении отмечено, что ловушки существенно снижают пробивное напряжение, значительно увеличивают токи утечки затвора при увеличении напряжения на стоке. Использование второго барьерного слоя позволяет ограничить токи утечки по затвору и исключить возможный пробой сток-исток за счет снижения поляризационных воздействий в структуре. При этом, максимальное допустимое рабочее напряжение ограничивается превышением затворного или стокового тока утечки.

На **секции 2** обсуждались конструкции и параметры СВЧ-компонентов, вопросы их надежности, а также моделирование и экстракция параметров моделей СВЧ-транзисторов.

Павел Сергеевич Сорвачев, инженер первой категории АО «Микроволновые системы», посвятил свое выступление результатам разработки МИС управления амплитудой и фазой сигнала Ку-диапазона частот, реализованной на основе GaAs pHEMT-процесса с топологической нормой 0,15 мкм. Кристалл MSP010D имеет 3-портовую конфигурацию и содержит следующие компоненты: три двухпозиционных коммутатора, обеспечивающих переключение приемного и передающего режимов; малошумящий усилитель на входе приемного канала, 6-разрядный аттенюатор, 6-разрядный фазовращатель, а также два буферных усилителя в общем плече; предварительный усилитель мощности на выходе передающего канала; цепи стабилизации затворного смещения активных элементов усилителей; высокоскоростной последовательно-параллельный драйвер управления состояниями и режимами схемы (время переключения амплитудных и фазовых состояний не более 40 нс, время загрузки данных на частоте 100 МГц не более 250 нс). Габаритные размеры кристалла $6,0 \times 3,8 \times 0,1$ мм (рис. 5).

Анатолий Васильевич Галдецкий, начальник отделения АО «НПП „Исток“ им. А. И. Шокина», доложил о возможном пути решения проблем традиционной конструкции мощных СВЧ-транзисторов. В частности, он отметил: транзисторы с параллельным расположением пальцев при повышении мощности требуют значительного увеличения ширины кристалла, что создает проблемы при монтаже и ведет к росту габаритов кристалла. При этом уменьшение шага расположения пальцев (с целью уменьшения ширины кристалла) приводит к трудностям обеспечения теплового режима

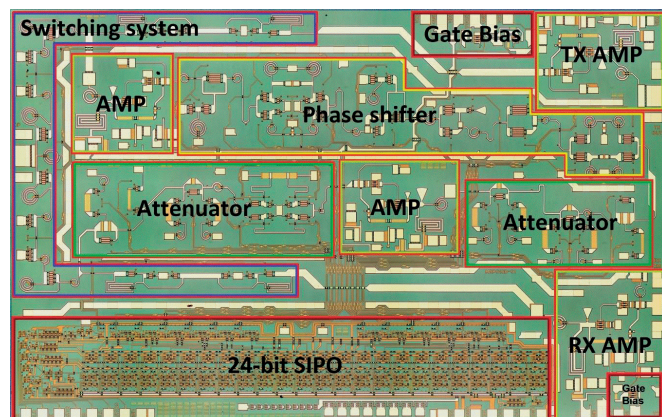


Рис. 5. МИС управления амплитудой и фазой Ку-диапазона частот MSP010D

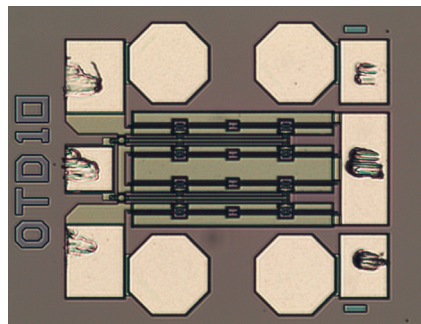


Рис. 6. Транзистор с затворной шиной с двумя звеньями и двумя ячейками

и необходимости уменьшения толщины кристалла до 25–30 мкм, что также осложняет монтаж. Кроме того, при увеличении ширины области, занимаемой транзистором, увеличивается продольный размер схем суммирования и изделия в целом. Основная идея решения заключается в использовании отдельной длинной низкоомной затворной шины для передачи входного напряжения, разбиении пальцев затвора на короткие микропальцы для обеспечения выравнивания амплитуды напряжения по длине затворов. Авторы разработали теорию, провели конструктивное, электромагнитное и тепловое моделирование, а также изготовили прототип транзистора с затворной шиной (рис. 6). Применение затворной шины позволило уменьшить площадь транзисторного чипа без изменения получаемой от него СВЧ-мощности и, как следствие, увеличить количество чипов с полупроводниковой пластины в 1,2–3 раза.

Станислав Вадимович Миннебаев, ведущий конструктор АО «Микроволновые системы», рассказал о разработке, серийном выпуске и использовании в усилителях мощности дискретных AlGaIn/GaN/SiC СВЧ-транзисторов серии МСК. В докладе приведены параметры транзисторов МСК и их сравнение с зарубежными аналогами, в том числе снятыми с производства. Также представлены результаты модернизации серийных изделий путем замены активной элементной базы на нитрид-галлиевые транзисторы собственной разработки.

Константин Михайлович Амбуркин, научный сотрудник дизайн-центра приемопередающей ЭКБ и РЭА АО «ЭНПО СПЭЛС», доложил о создании аппаратно-программного комплекса для характеристики GaN HEMT на различных этапах жизненного цикла: как на пластине, так и после корпусирования. Измерения проводятся в широком диапазоне температур, напряжений питания и входных мощностей. Полученные результаты применяются для создания математических моделей и последующего сопровождения производства.

Игорь Олегович Метелкин, инженер первой категории АО «Микроволновые системы», осветил вопросы экстракции параметров и использования нелинейной



МИКРОВОЛНОВЫЕ
СИСТЕМЫ

ИНТЕЛЛЕКТ • КАЧЕСТВО

**Ведущий российский СВЧ ФАБЛЕСС-ЦЕНТР,
осуществляющий весь комплекс работ по разработке
кристаллов, корпусированию СВЧ-компонентов
и испытаниям**



НАШИ ВОЗМОЖНОСТИ - ВАШЕ ПРЕИМУЩЕСТВО:

- Разработка, изготовление и поставка СВЧ МИС любой сложности на основе GaAs и GaN
- 100% контроль и гарантия качества
- Индивидуальный подход
- Минимальные сроки от разработки до поставки
- Техническая инженерная поддержка

АО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»

105122, Россия, г. Москва,
Щёлковское шоссе, д. 5, стр. 1

Тел.: +7(499) 644-21-03

mwsystems@mwsystems.ru

www.mwsystems.ru



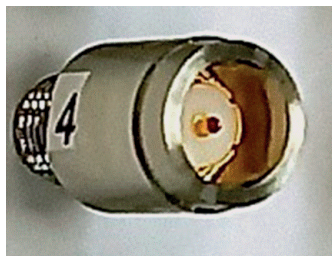


Рис. 7. SMA-адаптер быстрого подключения

параметров модели ASM-HEMT с учетом влияния эффектов саморазогрева и ловушек, включая эффекты памяти, drain-lag и gate-lag.

Артём Александрович Попов, руководитель отдела разработки моделей ООО «50ом Технолоджиз», доложил о влиянии различных методов «деэмбеддинга» на значения экстрагированных параметров малосигнальной эквивалентной схемы интегрального СВЧ-транзистора. В качестве исходных данных использованы результаты измерений пассивных тестовых структур и СВЧ-транзисторов, изготовленных по техпроцессу 0,25 мкм GaAs pHEMT на базе АО «НПП „Исток“ им. А. И. Шокина». Исследования проведены на СВЧ-транзисторах с фиксированной общей шириной затвора в микрополосковом и копланарном исполнениях. По результатам сравнения автором сформулированы рекомендации по выбору метода «деэмбеддинга» с точки зрения точности малосигнальной модели и рационального использования площади тестового кристалла на пластине.

Александр Владимирович Андросов, ведущий инженер АО «НПП „Исток“ им. А. И. Шокина», рассказал о разработке отечественного SMA-адаптера быстрого подключения для применения в диапазоне 0–26 ГГц с КСВН ≤ 1,2, потерями не более 0,1 дБ и гарантированным количеством соединений не менее 1000 (рис. 7), а также привел результаты анализа параметров 15 зарубежных и 2 отечественных адаптеров, отметив, что применению зарубежных SMA-адаптеров препятствует различие диаметров центральных штыревых проводников отечественных и зарубежных соединителей.

Андрей Викторович Корнев, главный конструктор АО «Иркутский релейный завод», представил результаты разработки, изготовления

модели ASM-HEMT нитрид-галлиевого транзистора. Особое внимание было уделено требованиям к измерениям в импульсном и непрерывном режимах и автоматизации как процедур измерений, так и последующей математической обработки данных. Представлены результаты экстракции

и испытаний коаксиальных СВЧ-нагрузок SMA, тип IX и SMP (рис. 8), и переключателя 1П2Н со встроенными согласованными нагрузками. Разработанные нагрузки выполнены с поперечным расположением резистивного элемента, который представляет собой прямоугольную плату с резистивным слоем в виде двух резисторов. Плата выполнена на основании из AlN толщиной 0,5 мм. Разработанные нагрузки SMA (вилка) являются аналогами продуктов Rosenberger и Huber+Suhner, а нагрузки SMP (розетка) – аналогами нагрузок Radiall и Rosenberger, и работоспособны до $P_{\text{вх}} = 2$ Вт.

Михаил Сергеевич Попов, заместитель начальника отдела СВЧ-электроники ФГБУ «ВНИИР», доложил о проведенной предприятием в рамках подготовки изменений в постановление Правительства Российской Федерации № 719 работе по оценке возможностей замены ЭКБ ИП, применяемой при создании отечественного телекоммуникационного оборудования, включая базовые станции сотовой связи, на период до 2030 года. Проанализировано 64 типонаименования СВЧ ЭКБ ИП в диапазоне до 5 ГГц, из которых только три позиции не могут быть замещены в настоящее время в связи с отсутствием технологий.

Алексей Николаевич Пашков, заместитель начальника НПК АО «НПП „Исток“ им. А. И. Шокина», представил результаты исследования структуры, состава, фаз и анализа напряжений разработанных ферритовых материалов на основе технологии низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (LTCC). Были определены и зафиксированы кривые зависимостей относительно удлинения образцов от температуры для каждого из составов, исследованы макеты ферритового материала литиевой феррошпинели и других кристаллических структур (гранат, гексаферрит) для СВЧ-диапазона, изготовленные по технологии LTCC. В докладе показаны образцы и результаты измерений различных ферритовых изделий (рис. 9).



Рис. 8. SMP – коаксиальные СВЧ-нагрузки



Рис. 9. Ферритовые изделия, изготовленные по технологии LTCC

ЛИТЕРАТУРА

1. Lu J., Chen J.-T., Dahlqvist M., et al. Transmorphic epitaxial growth of AlN nucleation layers on SiC substrates for high-breakdown thin GaN transistors. // Applied Physics Letters, 2019. 115 (22). pp.221601.
2. Веб-ресурс: <https://swegan.se/quanfine/>.
3. Веб-ресурс: <https://swegan.se/technology/>.



Министерство науки
и высшего образования
Российской Федерации



Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)



ОАО «НПП «Исток»
им. Шокина»

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ
СПОНСОР



ООО Планар, Челябинск



INWAVE, Москва



ООО «Инфостера», Москва



ГРУППА КОМПАНИЙ

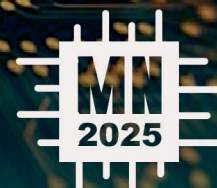
WWW.MWELECTRONICS.ETU.RU

2-6
ИЮНЯ
2025

Санкт-Петербург,
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

XIV ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ЭЛЕКТРОНИКА И МИКРОЭЛЕКТРОНИКА СВЧ»

- Физические явления и материалы СВЧ электроники и микроэлектроники
- Пассивные элементы и устройства СВЧ электроники и микроэлектроники
- Приборы твердотельной СВЧ электроники и микроэлектроники
- Приборы вакуумной и плазменной СВЧ электроники и микроэлектроники
- Антенны и фазированные антенные решетки
- Измерения на СВЧ и междисциплинарные исследования
- Радиофотоника
- Компонентная база силовой электроники
- Электромагнитная совместимость



В РАМКАХ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
ФОРУМА МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ
И НЕЙРОТЕХНОЛОГИЙ

Тел.: +7 (812) 234-99-83

+7 (812) 346-46-37

E-mail: mwelectronics@etu.ru

IRVC.eltech@mail.ru

WWW.MWELECTRONICS.ETU.RU

- Сборник материалов с индексацией РИНЦ
- Выставка оборудования предприятий-партнеров
- Повышение квалификации по программе «Решение перспективных задач электроники и микроэлектроники СВЧ», объемом 40 ак.часов с выдачей удостоверения установленного образца