

# Особенности проектирования и изготовления МИС СВЧ GaN фазовращателей

А.Г. Тимошенко, Е.О. Белоусов, К.М. Моленкамп

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», timoshenko@edu.miet.ru

**Аннотация** — В статье представлены результаты по проектированию МИС СВЧ фазовращателей на основе GaN. Разработана и описана модель транзистора для реализации фазовращателя. Для схемы проведена оптимизация и моделирование для каждой рабочей частоты 0,1–31,5 ГГц. Фазовращатель выполнен в виде переключаемого звена ФВЧ, обеспечивающего фазовый сдвиг 90° при минимальных потерях на рабочей частоте. Рассчитаны номиналы элементов ФВЧ для работы фазовращателя в диапазонах частот до 55 ГГц.

**Ключевые слова** — сверхвысокие частоты, монолитные интегральные схемы, широкозонные полупроводники, GaN, фазовращатели, малосигнальная модель транзистора, *s*-параметры.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Учитывая современные требования к электронной компонентной базе (ЭКБ) [1-4], в последние годы заметно активизировались исследования широкозонных полупроводников (карбида кремния, нитрида галлия, нитрида алюминия и др.) и приборов на их основе [5-16]. Используя в большинстве сверхвысокочастотных (СВЧ) приложений GaAs и InP обладают рядом недостатков [17], не благоприятствующих получению устройств с требуемыми характеристиками для современных сотовых систем связи 4-го поколения, спутниковых систем связи, РЛС и военного применения [18, 19]. Наиболее перспективным [20-26] широкозонным материалом в настоящее время является нитрид галлия, имеющий ширину запрещенной зоны около 3,5 эВ, подвижность и скорость насыщения электронов – около 2000 см<sup>2</sup>/В·с и 2,7·10<sup>7</sup> см/с соответственно, теплопроводность – более 1,5 Вт/м·К [27].

Целью статьи является описание процесса проектирования такого базового функционального элемента СВЧ ЭКБ, как фазовращатель, на основе GaN транзисторов с минимальным разрешением технологии 130/200 нм. В частности, для обеспечения возможности моделирования монолитных интегральных схем (МИС) с транзисторами с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ) усовершенствована SPICE Level 2 модель, и проверено ее соответствие экспериментальным результатам по измеренным образцам транзисторов.

## II. ОБЗОР GAN ФАЗОВРАЩАТЕЛЕЙ

В доступной литературе не так часто встречаются отдельные МИС GaN фазовращателей, но существуют варианты этих электронных компонентов для С-, Х- и Ku-диапазонов. В [28] разработан двухкаскадный фазовращатель для С-диапазона размером 30 × 30 мм, состоящий из 3-дБ квадратурного направленного ответвителя и распределителя Уилкинсона. Результаты моделирования и измерений показывают фиксированное смещение фазы 45° ± 5° в полосе частот 4–8 ГГц с вносимыми потерями менее 1 дБ и более чем 12 дБ потерь на отражение на центральных частотах С-диапазона. В то же самое время в [29] был разработан настраиваемый по напряжению фазовращатель на поверхностно-акустических волнах (ПАВ) на основе двухмерного электронного газа в AlGaIn/GaN гетероструктуре, работа которого обеспечивается изменением проводимости электронного газа путем приложения постоянного напряжения к структуре. Данная структура является совместимой с транзисторами и устройствами, изготовленными по GaN технологии для нужд обработки сигнала и контроля частоты.

В [30] была представлена МИС высоконадежного высокоомощного фазовращателя нового типа по 0,8 мкм GaN ТВПЭ технологии, работающего в X-диапазоне. Предложенный фазовращатель на 0°/45° с фильтрацией высоких/низких частот показывает низкие вносимые потери на уровне 2,5 дБ, хорошие потери по отражению и изменение амплитуды не более чем на 0,5 дБ для двухфазового состояния во всем рабочем диапазоне от 6 до 13 ГГц, а относительная производительность по фазе относительно постоянна по всей рабочей полосе.

Компания *TriQuint* имеет фазовращатели [31], работающие в диапазоне частот 6–18 ГГц (включая Х- и Ku-диапазоны), использующие 6-разрядную цифровую коррекцию, что обеспечивает работу с плавно регулируемой временной задержкой. Вносимые потери МИС колеблются в пределах 3,5–10 дБ со среднеквадратичной ошибкой по амплитуде порядка 0,5 дБ и фазовой ошибкой 3,5–10° [32]. Компания *RFMD* также планирует в ближайшем будущем разработать МИС фазовращателей [33].

### III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНЗИСТОРОВ

#### A. Малосигнальная модель транзистора

Для расчетов тока стока, порогового напряжения, крутизны по затвору, паразитных емкостей и проводимости канала GaN транзистора использовалась аналитическая модель *SPICE Level 2*. При разработке малосигнальной модели распределенные элементы рассматриваются как сосредоточенные; предполагаем, что характеристики всех элементов схемы не зависят от частоты и частью элементов можно пренебречь [34]. Малосигнальная эквивалентная модель для *AlGaIn/GaN* ТВПЭ [35], включающая в себя паразитные ёмкости между всеми терминалами и землёй, условно разделена на две части: внутренняя нелинейная и зависящая от смещения часть, не включающая в себя паразитные элементы, связанные с соединениями терминалов; и линейная, не зависящая от смещения часть, включающая паразитные элементы. Если пренебречь некоторыми паразитными емкостями и преобразовать сопротивления переходов затвор-исток и затвор-сток ( $R_{fgs}$  и  $R_{fgd}$ ), модель может быть упрощена. Стоит заметить, что сопротивление  $R_i$  внутренней части обозначает рекомбинацию доноров под обедненной областью затвора; время задержки  $\tau$  – время, за которое обедненная область реагирует на изменения сигнала на затворе.

Найдем отношение между параметрами внутренних элементов и  $u$ -параметрами. Примем, что транзистор работает в пологой области, тогда  $u$ -параметры внутренней части  $y_{int}$  могут быть записаны как:

$$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (j\omega C_{GS} \parallel R_i^{-1}) + (j\omega C_{DG} \parallel R_{GD}^{-1}) + R_{fdg}^{-1} + R_{fgs}^{-1} \\ \times -(j\omega C_{GD} \parallel R_{DG}^{-1}) - R_{fdg}^{-1} \\ \frac{g_m e^{-j\omega\tau}}{1 + j\omega C_{GS} R_i} - (j\omega C_{DG} \parallel R_{DG}^{-1}) - R_{fdg}^{-1} \\ \times R_{DS}^{-1} + R_{fdg}^{-1} + j\omega C_{DS} + j\omega C_{GD} \parallel R_{DG}^{-1} \end{bmatrix} \cdot (1)$$

На малых частотах в мегагерцовом диапазоне слагаемые, включающие ёмкость, в  $y_{11}$  и  $y_{12}$  в (1) стремятся к нулю, следовательно, могут быть определены  $R_{fgs}$  и  $R_{fgd}$ . Выделение действительной и мнимой части составляющих (1) даёт возможность определить остальные параметры модели.

#### B. Необходимость корректировки математических моделей транзисторов

Разработанная аналитическая модель (*SPICE Level 2*) требует корректировки по двум причинам: учёт поляризации заряда, влияющего на общий заряд в канале и, в конечном итоге, на выражение тока стока; учёт качественного и количественного состава гетероструктуры при вычислении параметров модели. В то же самое время малосигнальная модель может быть уточнена по результатам проведенных экспериментальных исследований в части исследуемых параметров, что не влияет на применяемые аналитические выражения и эквивалентную схему модели.

#### C. Уточнение поляризации заряда в описании аналитической модели

Причина возникновения двумерного электронного газа в GaN отличается от других устройств на основе ТВПЭ. Полярный характер *AlGaIn/GaN* системы приводит к спонтанной поляризации, и, кроме того, различие в постоянных решетки из-за двух слоев приводит к пьезоэлектрической поляризации. В GaN ТВПЭ двумерный электронный газ не индуцируется введением примесей, но вместо этого поверхностные состояния действуют подобно акцепторам на слое *AlGaIn* под воздействием спонтанного и пьезоэлектрического электрического поля в *AlGaIn* слое. Последнее необходимо учитывать при интеграции модели в современные САПР.

Удержание электронов в квантовой яме и отсутствие примесей в результирующем канале приводит к высокой подвижности и пиковой скорости. Работа транзистора требует от терминала затвора модулировать двумерный электронный газ и, следовательно, ток сток-исток ( $I_{DS}$ ). Поскольку двумерный электронный газ существует из-за гетероструктуры, отрицательное напряжение на затворе требуется для обеднения слоя под затвором и предотвращения тока. Таким образом, транзисторы на основе GaN ТВПЭ без специально разработанного подключения затвора, как правило, находятся всегда во включенном режиме (режим обеднения,  $D$ -режим) [36, 37]. Используя данные основные принципы работы транзистора, можно учитывать особенности *MIT Virtual Source GaNFET (MVSF)* РЧ модели, описывающей поведение транзистора при рабочем напряжении смещения, для корректировки математической модели.

В [37] модель предлагает рассматривать транзистор как совокупность последовательно соединенных транзисторов: внешних, постоянно проводящих, и внутреннего, находящегося непосредственно под затвором, где двумерный электронный газ модулируется напряжением затвора ( $V_g$ ). Внешние эквивалентные транзисторы, находящиеся между истоком-затвором и стоком-затвором, моделируются как нелинейные транзисторы с неявным затвором. Данное допущение крайне важно для включения его в разработанную ранее модель, так как в проекте эти области составляют 300 нм и 1070 нм для транзисторов с длиной затвора 130 нм. Можно учесть перенос носителей в этих разных областях транзистора с помощью модели подсхемы [37] GaN ТВПЭ, где внешние терминалы обозначим  $d$  (сток),  $g$  (затвор) и  $s$  (исток), при этом внутренние затворы будут действовать так же, как и внешние (рис. 1). Внутренний терминал стока внутреннего транзистора обозначим  $si$ , а внутренний терминал истока –  $di$ . Кроме того, на рис. 1 показаны сопротивления контактов истока и стока, которые требуют введения дополнительных внутренних узлов:  $src$  и  $drc$ .

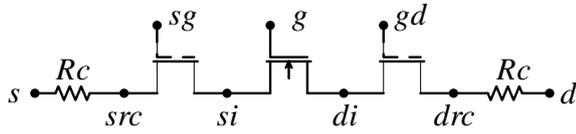


Рис. 1. Эквивалентная схема транзистора с виртуальными внутренними узлами

Так как разность в размерах областей транзисторов учтена в параметрах внешних эквивалентных транзисторов, будем считать, что во внутреннем транзисторе обеспечена симметрия исток-сток. Для этого в модель введем принудительное выравнивание потенциалов внутреннего транзистора  $V_{gsi}$  и  $V_{gdi}$  при нулевом смещении  $V_{ds}$ .

Области между затвором, истоком и стоком не имеют фактического терминала затвора. Неявный терминал затвора не существует и связан только с поверхностным сопротивлением  $R_{sh}$  (от 300 до 400 Ом/□) и подвижностью носителей  $\mu_0$  (от 1500 до 1200 см<sup>2</sup>/В·с (параметры определены по результатам количественного и качественного анализа гетероструктур методом ВИМС) в этих областях за счет дополнительного параметра  $C_{grs}$  ( $C_{grd}$ ) [37], отличающегося из-за размеров области.

Так как средняя длина свободного пробега в GaN очень коротка, перенос электрона не может быть полностью баллистическим. Зона проводимости имеет пик в узле  $si$ , близкому к собственному истоку ( $x = x_0$ ), что позволяет моделировать область внутреннего транзистора как квазибаллистический полевой транзистор [38]. При использовании приближения заряда ток стока нормализуется по ширине полевого транзистора и может быть описан произведением местной плотности носителей и скорости носителей в любом месте в канале. Плотность заряда виртуального источника может быть аппроксимирована довольно точно эмпирической функцией:

$$Q_{ix0} = C_g n \varphi_i \ln \left( 1 + \exp \left( \frac{V_{gsi} - (V_T - \alpha \varphi_i F_f)}{n \varphi_i} \right) \right), \quad (2)$$

где  $C_g$  является эффективной емкостью затвор-канал на единицу площади в режиме насыщения;  $n$  – коэффициент подпороговой области;  $\varphi_i$  – тепловое напряжение.  $V_{gsi}$  является внутренним напряжением затвор-исток (рис. 1) с поправкой на падение напряжения на области доступа источника.  $V_T$  – пороговое напряжение с поправкой из-за эффекта короткого канала.  $\alpha = 3,5$  учитывает сдвиг порогового напряжения в сильном и слабом насыщении. Функция Ферми  $F_f$  обеспечивает плавный переход между двумя значениями  $V_T$ . Для напряжения насыщения используем эвристические выражения [38]. С учётом этого заряда выражение для тока порогового напряжения примет вид:

$$V_{off} = \phi_b - \frac{1}{q} \Delta E_c - V_{p2} - \frac{qd}{\varepsilon_2} (n_p + Q_{ix0} + N_B W_d). \quad (3)$$

В GaN ТВПЭ скорости электронов уменьшаются, во время как плотности заряда увеличиваются из-за сильного электрон-оптического фононного рассеяния, а из-за высоких плотностей тока и плохой теплопроводности они обладают высокой рассеиваемой мощностью. Для моделирования этих эффектов и их влияния на скорости и подвижности носителей используем выражения из [39, 40].

Зарядовая модель внутреннего транзистора использует разделение заряда Ворда-Даттона для заряда затвор-исток ( $Q_{gsi}$ ) и заряда затвор-сток ( $Q_{gdi}$ ). Однако следует учитывать, что в отличие от модели заряда затвора в длинном канале, где перенос происходит на основе дрейф-диффузии [41], квазибаллистический перенос приводит к тому, что полная плотность заряда в области затвора в среднем будет ниже. Это связано с меньшей средней плотностью заряда канала, так как баллистический перенос имеет более высокую скорость носителей в большей части канала по сравнению с длинноканальным переносом [42].

Области между затвором, истоком и стоком предполагаются достаточно длинными (по сравнению с длиной свободного пробега), так что перенос носителей основан на диффузионном дрейфе [39]. Таким образом, модель с неявным затвором для этих областей, по существу, является моделью транзистора с длинным каналом. Напряжение перевозбуждения затвора связано с поверхностным сопротивлением, как указано в [43]. Остальные положения для уравнений канала – как для традиционной модели полевого транзистора с длинным каналом.

В дополнение к емкостям затвор-канал изготовленные транзисторы также имеют внешние и внутренние окаймляющие емкости, обусловленные краевыми эффектами. Внутренние емкости зависят от состояния по двумерному электронному газу в канале, внешние не зависят и могут быть экстрагированы в модель из вольт-фарадных характеристик во включенном состоянии для транзисторов с различными длинами с сохранением других элементов геометрии, согласно моделированию в САПР *Synopsys TCAD* и проведенным измерениям.

#### D. Проведение измерений и уточнение s-параметров для модели GaN транзистора

Разработанная модель [44, 45] позволяет встраивать её в современные САПР в виде подсхемы и проводить моделирование основных параметров устройств и элементов схем. На рис. 2 и 3 показаны результаты моделирования (сплошная линия) в сравнении с результатами экспериментальных исследований при  $V_{gs} = -1,5$  В,  $V_{ds} = 10$  В. Измерения проводились на наборе экспериментальных образцов многопальцевых транзисторов, изготовленных с помощью нанотехнологического комплекса НаноФаб 100 (МИЭТ), с ширинами от 0,2 до 2 мм и затворами длиной 130 и 200 нм, сформированными с помощью фокусированного ионного пучка. Из

графиков видно, что основные зависимости совпадают, а разброс параметров незначителен.

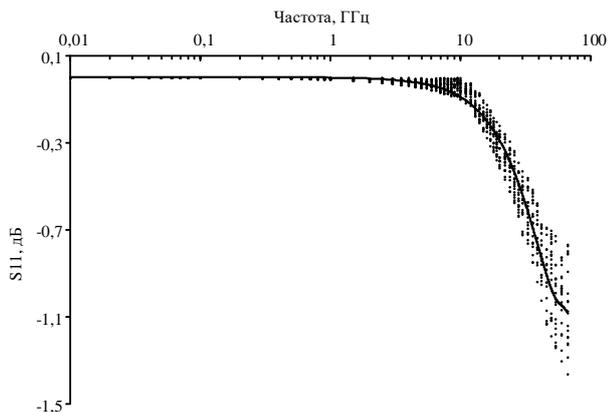


Рис. 2. Значения  $S_{11}$  измеренных транзисторов (точки) и модели транзистора (сплошная)

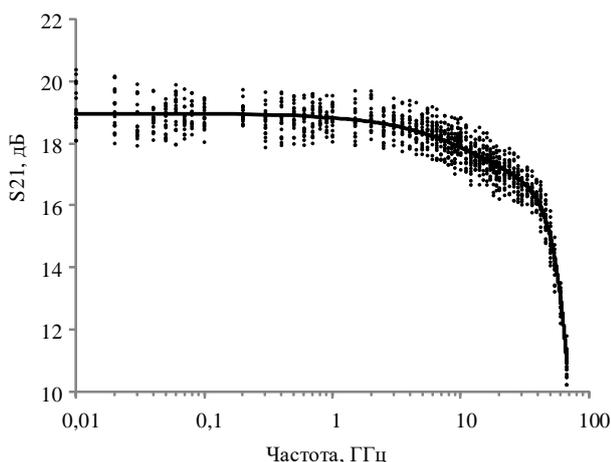


Рис. 3. Значение  $S_{21}$  измеренных транзисторов (точки) и модели транзистора (сплошная линия)

#### IV. РАЗРАБОТКА МИС ФАЗОВРАЩАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ GAN

При разработке фазовращателя был использован метод переключаемых фильтров высоких (ФВЧ) и низких (ФНЧ) частот [46], секция такого фазовращателя показана на рис. 4. Каждый из фильтров рассчитывается на определенную частоту, на которой он обеспечивает фиксированный сдвиг фазы.

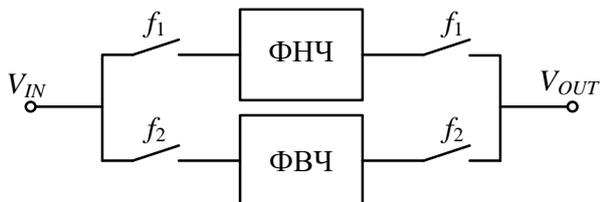


Рис. 4. Секция фазовращателя с переключаемыми фильтрами

Предложенная схема звена фазовращателя на основе ФВЧ показана на рис. 5. Схема состоит из LC ФВЧ третьего порядка, состоящего из элементов  $L_1$ ,  $L_2$ ,

$C_1$ , а также ключей  $M_1$  и  $M_2$ . Для различных частот и смещений фазы необходимо проводить расчет ФВЧ, в данной работе расчеты проводились для сдвига фазы на  $90^\circ$  на рабочей частоте. Рассчитанные номиналы элементов ФВЧ указаны в табл. 1, номиналы обеих индуктивностей одинаковы для всех частот.

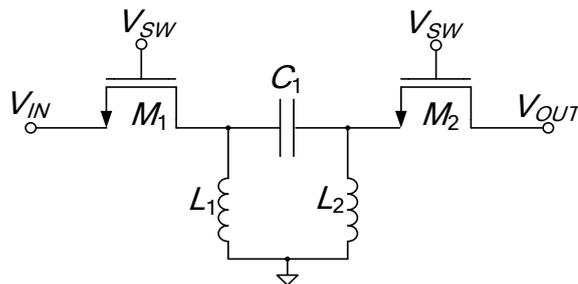


Рис. 5. Схема звена фазовращателя на основе ФВЧ

Таблица 1

Номиналы элементов ФВЧ для различных рабочих частот и сдвига фазы на  $90^\circ$

№	Рабочая частота, ГГц	$C_1$ , пФ	$L_1, L_2$ нГн
1	1,246	2,56	6,2
2	1,602	2	4,97
3	2,4	1,3	3,3
4	3,9	0,82	2,04
5	6,225	0,52	1,28
6	18,5	0,16	0,4
7	30	0,09	0,22

Для каждого набора значений элементов из табл. 1 были проведены моделирования в среде *SpectreRF* для измерения рабочего диапазона частот и величины паразитной амплитудной конверсии. Для каждого звена фазовращателя были измерены предельные значения фазового сдвига, достижимые при потерях, допустимых в указанном диапазоне частот. Сдвиг фазы на рабочей частоте был рассчитан как  $360^\circ$  минус значение на ФЧХ на рабочей частоте. Получившиеся значения приведены в табл. 2, а также на рис. 6 и 7 на примере диапазонов частот 10–25 ГГц и 10–55 ГГц.

Таблица 2

Полученные после моделирования параметры ФВЧ для различных частотных диапазонов, потери и сдвиг фазы на  $90^\circ$

№	Диапазон рабочих частот, ГГц	Потери на частоте с фазовым сдвигом $90^\circ$ , дБ	Сдвиг фазы при предельном значении потерь
1	0 – 3	0,1	0,5 дБ, $135^\circ$
2	0,5 – 4	0,25	0,5 дБ, $135^\circ$
3	0,5 – 4	0,25	0,5 дБ, $135^\circ$
4	2 – 5	0,25	1 дБ, $145^\circ$
5	2 – 10	0,25	1 дБ, $145^\circ$
6	10 – 25	0,15	2 дБ, $155^\circ$
7	10 – 55	0,2	2 дБ, $155^\circ$

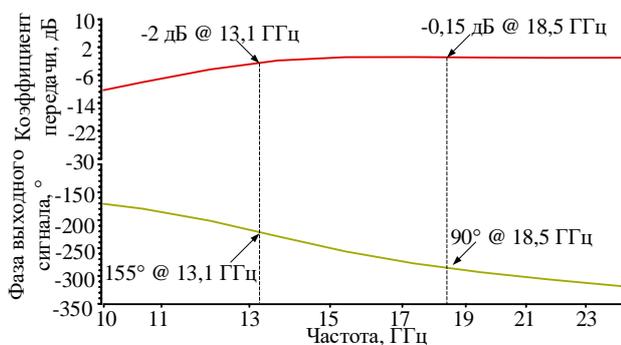


Рис. 6. АЧХ и ФЧХ звена фазовращателя для диапазона частот 10–25 ГГц

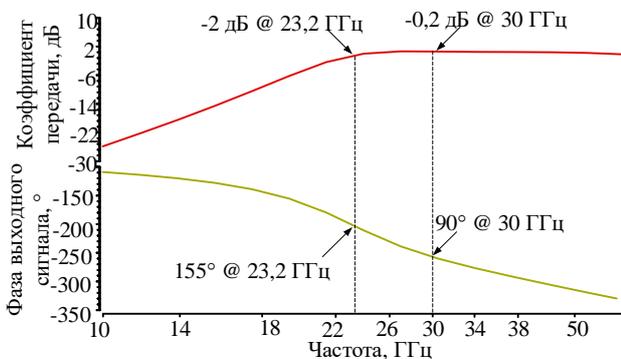


Рис. 7. АЧХ и ФЧХ звена фазовращателя для диапазона частот 10–55 ГГц

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье описывается проектирование фазовращателя на основе GaN ТВПЭ. Проведен обзор существующих GaN МИС фазовращателей. Далее была разработана SPICE модель транзистора на основе GaN, описанная в разделе III, позволившая провести проектирование конструктивно-технологических параметров транзистора, используя доступные программные средства. Были изготовлены экспериментальные образцы GaN транзисторов. При предварительном анализе получены значения величины сопротивления омических контактов  $0,36 \text{ Ом}\cdot\text{мм}$  ( $3,99 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ ), что соответствует мировым аналогам.

Были выбраны схемотехнические решения при разработке МИС для реализации фазовращателя, как описано в разделе IV. Для схемы проведена оптимизация и моделирование для каждой рабочей частоты и в диапазоне температур. В ходе моделирования были измерены предельные значения фазовых сдвигов при допустимых потерях и рассчитаны номиналы элементов.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность компании ООО «РОДЕ и ШВАРЦ РУС» представителю компании «Rohde & Schwarz» в Москве за эффективное сотрудничество.

#### ПОДДЕРЖКА

Результаты получены при выполнении ПНИ по соглашению № 14.575.21.0097 (уникальный идентификатор RFMEFI57514X0097) при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hudgins J. L. Wide and narrow bandgap semiconductors for power electronics: A new valuation. // Journal of Electronic Materials. - 2003. - V. 32. - N. 6. - P. 471–477.
- [2] Itoh Y., Honjo K. Fundamental Perspective of Future High Power Devices and Amplifiers for Wireless Communication Systems // IEICE Transactions on Electronics, 2003. - V. E86C. - N. 2. - P. 108–119.
- [3] Данилин В.Н., Жукова Т.А., Кузнецов Ю.А. и др. Обзоры по электронной технике. Сер.1, СВЧ Техника. - 2001. - Вып.1. - 135 с.
- [4] Данилин В.Н., Жукова Т.А. и др. Транзистор на GaN пока самый "крепкий орешек" // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2005. - № 4. - С. 20–29.
- [5] Mark Valentine, SiC Technology Enables Discrete Revolutions// Power Electronics Technology, Nov. 2006, pp. 38-39.
- [6] Bougrov V., Levinshtein M.E., Romyantsev S.L., Zubrilov A., in Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe // John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001. - pp. 1–30
- [7] W.L.Pribble et al. Application of SiC MESFETs and GaN HEMTs in Power Amplifier Design // IEEE MTT-S Digest, 2002, p.1819-1822.
- [8] J.W.Palmour et al. SiC and GaN Based Transistor and Circuit Advances // Proc. On 12-th GAAS Symposium, 2004, p. 555-558.
- [9] A.Sayed, G.Boeck. An Empirical Large Signal Model for Silicon Carbide MESFETs // Proc. On 13-th GAAS Symposium, 2005, p. 313-316.
- [10] А.А.Кишинский. Усилители мощности диапазона 0.8-2.5 ГГц на SiC-транзисторах. Материалы 16-ой Международной Крымской конференции "СВЧ-техника и телеком-муникационные технологии", 2006, стр.171-172.
- [11] S.J. Pearton, F. Ren, A.P. Zhang, K.P. Lee. Fabrication and Performance of GaN Electronic Devices // Material Science and Engineering Reports R. - 2000. - V. 30. - p. 55 - 212.
- [12] K. Tsarik, K. Lavrentiev, V. Nevolin, V. Petukhov AlN sensor based on surface acoustic wave with signal amplification by AlN/GaN HEMT // ICCICCT, Dec. 2015. - pp.734–737.
- [13] R. Dimitrov, M. Murphy, J. Smart et al. Two-dimensional electron gases in Ga-face and N-face AlGaIn/GaN heterostructures grown by plasma-induced molecular beam epitaxy and metalorganic chemical vapor deposition on sapphire // Journal of Applied Physics.- 2000. -V.87. - N.7. - P. 3375-3380.
- [14] A. Fissel. Artificially layered heteropolytypic structures based on SiC polytypes: molecular beam epitaxy, characterization and properties // Physics Reports – 2003. – Vol. 379 – P. 149-255.
- [15] Ragle, D.; Kayali, S., Hydrogen effects on GaAs microwave semiconductors // Proceedings of GaAs Reliability Workshop, 1997. - pp.66–71
- [16] Alex Dobrinsky, Grigory Simin, Remis Gaska and Michael Shur III-Nitride Materials and Devices for Power Electronics / ECS Transactions, volume 58, issue 4, 2013. - pp. 129–143

- [17] Bowick C. RF Circuit Design, 3rd Edition / Newnes, 288 p.
- [18] И. Викулов GaN-микросхемы приемопередающих модулей АФАР: Европейские разработки. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес 2009 №7. стр. 90-97
- [19] Bakhtin, A., Semenova, A., Omelyanchuk, E., Teplyakov, I. On possibilities of capacity increasing of high speed radio downlink // International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, January, 2015. – pp. 184-189.
- [20] Pengelly, R.S.; Wood, S.M.; Milligan, J.W.; Sheppard, S.T.; Pribble, W.L., "A Review of GaN on SiC High Electron-Mobility Power Transistors and MMICs," Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on , vol.60, no.6, pp.1764,1783, June 2012.
- [21] Reese, E.; Allen, D.; Taehun Lee; Tuong Nguyen, "Wideband power amplifier MMICs utilizing GaN on SiC," Microwave Symposium Digest (MTT), 2010 IEEE MTT-S International , vol., no., pp.1230,1233, 23-28 May 2010.
- [22] J.P.B. Janssen, M. van Heijningen, G. Provenzano, G.C. Visser, E. Morvan, F.E. van Vliet X-band Robust AlGaIn/GaN Receiver MMICs with over 41 dBm Power Handling / Compound Semiconductor Integrated Circuits Symposium, 2008. CSIC '08. IEEE , 12-15 Oct 2008, USA Monterey, CA (pp. pp. 1-4)
- [23] Pilsoon Choi, Sushmit Goswami, Chirn Chye Boon, Li-Shiuan Peh, Hae-Seung Lee A Fully Integrated 5.9GHz RF Frontend in 0.25um GaN-on-SiC for Vehicle-to-Vehicle Applications / 2014 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. – pp. 397–400
- [24] P. Schuh, H. Sledzik, R. Reber, A. Fleckenstein, R. Leberer, M. Oppermann, R. Quay, F. van Raay, M. Seelmann-Eggebert, R. Kiefer, M. Mikulla GaN MMIC based T/R-Module Front-End for X-Band Applications / Microwave Integrated Circuit Conference European - EuMIC , 2008. – pp. 274 – 277
- [25] A. Bettidi, A. Cetronio, M. Cicolani, C. Costrini, C. Lanzieri, S. Maccaroni, L. Marescialli, M. Peroni, P. Romanini X-band T/R module in state-of-the-art GaN technology / Radar Conference, 2009. EuRAD 2009. European, 2009. – pp. 258–261
- [26] S. Masuda, M. Yamada, T. Ohki, K. Makiyama, N. Okamoto, Y. Nakasha, K. Imanishi, T. Kikkawa, H. Shigematsu C-Ku band GaN MMIC T/R frontend module using multilayer ceramics technology / Microwave, MTT-S International Symposium - MTT, 2011. – pp. 1–4
- [27] Ю.Р. Ефименков, В.О. Ткаченко, В.Н. Данилин. Исследования по созданию мощного СВЧ транзистора с барьером Шоттки, на GaN, с затвором, сформированным с помощью электронной литографии. // Материалы V Международной научно-технической школы-конференции Молодые ученые – 2008, часть 1, стр. 148-151.
- [28] Abbosh, A. M. (2008), Broadband fixed phase shifter for C-band applications. Microw. Opt. Technol. Lett., 50. – pp.396–399
- [29] J. Pedrós, F. Calle, R. Cuerdo, J. Grajal, Z. Bougrioua Voltage tunable surface acoustic wave phase shifter on AlGaIn/GaN / Applied Physics Letters, 96, 123505 (2010). – pp.1–2
- [30] Hettak, K., Ross, T. ; Gratton, D. ; Wight, J. A new type of GaN HEMT based high power high-pass/low-pass phase shifter at X band / Microwave Symposium Digest (MTT), 2012 IEEE MTT-S International, Montreal, QC, Canada, 17-22 June 2012. – pp. 1–3
- [31] TriQuint launches GaN amplifiers and GaAs phase shifters and high-power limiters // Semiconductors Today, 3 Dec. 2013. – URL: [http://www.semiconductor-today.com/news\\_items/2013/DEC/TRIQUINT\\_031213.shtm](http://www.semiconductor-today.com/news_items/2013/DEC/TRIQUINT_031213.shtm) (дата обращения: 05.04.2016)
- [32] Phase shifters // TriQuint Inc., 2014. – URL: <http://www.triquint.com/products/all/control-products/phase-shifters> (дата обращения: 05.04.2016)
- [33] R. Vetryu GaN: Applications in RF Systems Beyond The PA // RFMD Inc., 2014. – URL: [http://www.rfmd.com/sites/default/files/resources/migration/presentations/COMMWFA\\_RFMD\\_FINAL.pdf](http://www.rfmd.com/sites/default/files/resources/migration/presentations/COMMWFA_RFMD_FINAL.pdf) (дата обращения: 05.04.2016)
- [34] Berroth M., et. al. High-frequency equivalent circuit of GaAs FETs for large-signal applications// IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques, 1991. – C. 224-229
- [35] Jarndal A., et. al. A new small-signal modeling approach applied to GaN devices// IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005. – C. 3440.
- [36] K.A. Filippov, A.A. Balandin "Self-Heating Effects in GaN/AlGaIn Heterostructure Field-Effect Transistors and Device Structure Optimization", Technical Proceedings of the 2003 Nanotechnology Conference and Trade Show, Vol. 3, pp. 333-336
- [37] U. Radhakrishna 'Compact transport and charge model for Gallium Nitride-based HEMTs for radio-frequency applications', MIT, Jun.-2013, Citable Режим доступа: <http://hdl.handle.net/1721.1/82394> (дата обращения: 19.11.2015)
- [38] A. Khakifirooz, OM Nayfeh, and D. Antoniadis 'A simple semi-empirical short-channel MOSFET current-voltage model continuous across all regions of operation and employing only physical parameters', IEEE Trans. Electron Devices, vol.56, no. 8, pp. 1674–1680, Aug. 2009.
- [39] Y. Chang, Y. Zhang, Y. Zhang and KY Tong 'A thermal model for static current characteristics of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors including self-heating effect', Journal of App. Physics., 99 (044501), 2006.
- [40] RV Langevelde, FM Klaassen 'Effect of gate-field dependent mobility degradation on distortion analysis in MOSFETs', IEEE Trans. Electron Devices, vol.44, no. 11, pp. 2044–2052, Nov. 1997.
- [41] Y. Tsidividis 'Operation and modeling of the MOS transistor' –, 3 edition, Mcgraw Hill.
- [42] L. Wei, O. Mysore, and D. Antoniadis 'Virtual-Source-Based Self-Consistent Current and Charge FET Models: From Ballistic to Drift-Diffusion Velocity-Saturation Operation', IEEE Trans. Electron Devices, vol.59, no. 5, pp. 1263–1271, May. 2012.
- [43] U. Radhakrishna, D. Piedra, Y. Zhang, T. Palacios, D. Antoniadis 'Physics-based Compact Model of High Voltage GaN HEMTs: Experimental Verification, Field Plate Optimization and Charge Trapping', Electron Devices Meeting (IEDM), 2013 IEEE International , Dec. 2013.
- [44] E. Belousov, A. Timoshenko, K. Lomovskaya Survey on Designing a CAD Model for GaN HEMT Based on Measurements // Proceedings of IEEE EWDTS, Batumi, Georgia, September 26-29, 2015. – pp. 362–365.
- [45] A. Timoshenko, K. Lomovskaya, E. Belousov Radio Frequency and Signal Integrity Parameters for GaN MMIC // Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, St. Petersburg, Russia February 2-3, 2016 – pp. 495–499.
- [46] Robert V. Garver. Broad-Band Diode Phase Shifters. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 20, no. 5, May 1972.

# Design and development of monolithic IC of microwave GaN phase shifters

A.G. Timoshenko, E.O. Belousov, K.M. Molenkamp

National Research University of Electronic Technology (MIET), timoshenko@edu.miet.ru

**Keywords** — microwave, monolithic IC, wide band gap semiconductors, GaN, phase shifters, small signal model, s-parameters.

## ABSTRACT

Considering modern requirements for electronic components [1]-[4], recent research shows increased interest in design and development of wide band gap semiconductors and devices based on them [5]-[17]. To obtain required performance for modern 4G cellular communication systems, satellite communications and radio location [18]-[19], gallium nitride material [20]-[27] is currently being researched. The review of existing GaN monolithic ICs of phase shifters for microwave ranges is presented in Section II [28]-[33].

For creating the TCAD transistor model to calculate parameters of GaN transistor, analytical model *Level 2* was used. During model development, distributed circuit elements were considered as lumped elements [34]. Small signal equivalent model for AlGaIn/GaN HEMT [35] includes all parasitic capacitances and consists of two parts: internal non-linear, biased part without terminal parasitic elements and external linear, non-biased part with parasitics. After analysis, the transistors' layout was designed and transistor prototypes were fabricated. Measurements show ohmic contacts resistance of  $0.36 \Omega \cdot \text{mm}$ . Model *Level 2* parameters were corrected after measurements to consider the charge polarization, which affects drain current, and the exact heterostructure [36]-[43]. Designed model [44]-[45] can be built in modern CAD as a subcircuit and allows devices and circuit elements simulation. Comparison of simulation and measurements results shows good match of main dependence and negligible parameters variety.

The switched high and low frequency filters method was used for phase shifter [46]. Each of LC HF filters operates on certain frequency with fixed phase shift of  $90^\circ$ . For each design in the range of 0.1–31.5 GHz phase shifter working range, parasitic amplitude conversion and maximum phase shift with allowed losses were measured.

## ACKNOWLEDGEMENT

Authors thank *Rohde & Schwarz* Representative in Moscow for effective collaboration. Results are obtained during applied research under grant No. 14.575.21.0097, unique ID RFMEFI57514X0097, from Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

## REFERENCES

- [1] Hudgins J. L. Wide and narrow bandgap semiconductors for power electronics: A new valuation. // *Journal of Electronic Materials*. 2003. V. 32. No. 6. P. 471–477.
- [2] Itoh Y., Honjo K. Fundamental Perspective of Future High Power Devices and Amplifiers for Wireless Communication Systems // *IEICE Transactions on Electronics*, 2003. V. E86C. No. 2. P. 108–119.
- [3] Danilin V.N., Zhukova T.A., Kuznecov Ju.A. i dr. Obzory po jelektronnoj tehnike. Ser.1, SVCh Tehnika. 2001. Vyp.1. 135 p. (in Russian)
- [4] Danilin V.N., Zhukova T.A. i dr. Tranzistor na GaN poka samyj "krepkij oreshkek" // *JeLEKTRONIKA: NTB*. 2005. No. 4. pp. 20–29. (in Russian)
- [5] Mark Valentine, SiC Technology Enables Discrete Revolutions// *Power Electronics Technology*, Nov. 2006, pp. 38-39.
- [6] Bougrov V., Levinshtein M.E., Rumyantsev S.L., Zubrilov A., in *Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe* // John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001. pp. 1–30
- [7] W.L.Pribble et al. Application of SiC MESFETs and GaN HEMTs in Power Amplifier Design // *IEEE MTT-S Digest*, 2002, pp. 1819-1822.
- [8] J.W.Palmour et al. SiC and GaN Based Transistor and Circuit Advances // *Proc. On 12-th GAAS Symposium*, 2004, pp. 555-558.
- [9] A.Sayed, G.Boeck. An Empirical Large Signal Model for Silicon Carbide MESFETs // *Proc. On 13-th GAAS Symposium*, 2005, pp. 313-316.
- [10] A.A.Kishhinskij. Usiliteli moshhnosti diapazona 0.8-2.5 GGc na SiC-tranzistorah. Materialy 16-oj Mezhdunarodnoj Krymskoj konferencii "SVCh-tehnika i telekommunikacionnye tehnologii", 2006, pp. 171-172. (in Russian)
- [11] S.J. Pearton, F. Ren, A.P. Zhang, K.P. Lee. Fabrication and Performance of GaN Electronic Devices // *Material Science and Engineering Reports R*. 2000. V. 30. pp. 55-212.
- [12] K. Tsarik, K. Lavrentiev, V. Nevolin, V. Petukhov AlN sensor based on surface acoustic wave with signal amplification by AlN/GaN HEMT // *ICCICCT*, Dec. 2015. pp. 734–737.
- [13] R. Dimitrov, M. Murphy, J. Smart et al. Two-dimensional electron gases in Ga-face and N-face AlGaIn/GaN heterostructures grown by plasma-induced molecular beam epitaxy and metalorganic chemical vapor deposition on sapphire // *Journal of Applied Physics*. 2000. V.87. No. 7. pp. 3375-3380.
- [14] A. Fissel. Artificially layered heteropolytypic structures based on SiC polytypes: molecular beam epitaxy, characterization and properties // *Physics Reports*. 2003. Vol. 379. pp. 149-255.
- [15] Ragle, D.; Kayali, S., Hydrogen effects on GaAs microwave semiconductors // *Proceedings of GaAs Reliability Workshop*, 1997. pp.66–71

- [16] Alex Dobrinsky, Grigory Simin, Remis Gaska and Michael Shur III-Nitride Materials and Devices for Power Electronics / ECS Transactions, volume 58, issue 4, 2013. – pp. 129–143
- [17] Bowick C. RF Circuit Design, 3rd Edition / Newnes, 288 p.
- [18] I. Vikulov GaN-mikroshemy priemperedajushchih modulej AFAR: Evropejskie razrabotki. // Jelektronika: Nauka, Tehnologija, Biznes 2009 №7. str. 90-97 (in Russian)
- [19] Bakhtin, A., Semenova, A., Omelyanchuk, E., Teplyakov, I. On possibilities of capacity increasing of high speed radio downlink // International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, January, 2015. – pp. 184-189.
- [20] Pengelly, R.S.; Wood, S.M.; Milligan, J.W.; Sheppard, S.T.; Pribble, W.L., "A Review of GaN on SiC High Electron-Mobility Power Transistors and MMICs," Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on , vol.60, no.6, pp.1764,1783, June 2012.
- [21] Reese, E.; Allen, D.; Taehun Lee; Tuong Nguyen, "Wideband power amplifier MMICs utilizing GaN on SiC," Microwave Symposium Digest (MTT), 2010 IEEE MTT-S International , vol., no., pp.1230,1233, 23-28 May 2010.
- [22] J.P.B. Janssen, M. van Heijningen, G. Provenzano, G.C. Visser, E. Morvan, F.E. van Vliet X-band Robust AlGaIn/GaN Receiver MMICs with over 41 dBm Power Handling / Compound Semiconductor Integrated Circuits Symposium, 2008. CSIC '08. IEEE , 12-15 Oct 2008, USA Monterey, CA (pp. pp. 1-4)
- [23] Pilsoon Choi, Sushmit Goswami, Chirn Chye Boon, Li-Shiuan Peh, Hae-Seung Lee A Fully Integrated 5.9GHz RF Frontend in 0.25um GaN-on-SiC for Vehicle-to-Vehicle Applications / 2014 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium. – pp. 397–400
- [24] P. Schuh, H. Sledzik, R. Reber, A. Fleckenstein, R. Leberer, M. Oppermann, R. Quay, F. van Raay, M. Seelmann-Eggebert, R. Kiefer, M. Mikulla GaN MMIC based T/R-Module Front-End for X-Band Applications / Microwave Integrated Circuit Conference European - EuMIC , 2008. – pp. 274 – 277
- [25] A. Bettidi, A. Cetronio, M. Cicolani, C. Costrini, C. Lanzieri, S. Maccaroni, L. Marescialli, M. Peroni, P. Romanini X-band T/R module in state-of-the-art GaN technology / Radar Conference, 2009. EuRAD 2009. European, 2009. – pp. 258–261
- [26] S. Masuda, M. Yamada, T. Ohki, K. Makiyama, N. Okamoto, Y. Nakasha, K. Imanishi, T. Kikkawa, H. Shigematsu C-Ku band GaN MMIC T/R frontend module using multilayer ceramics technology / Microwave, MTT-S International Symposium - MTT, 2011. – pp. 1–4
- [27] Ju.R. Efimenkov, V.O. Tkachenko, V.N. Danilin. Issledovanija po sozdaniju moshhnogo SVCh tranzistora s bar'erom Shottki, na GaN, s zatvorom, sformirovannym s pomoshh'ju jelektronnoj litografii. // Materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy shkoly-konferencii Molodye uchenye – 2008, chast' 1, str. 148-151. (in Russian)
- [28] Abbosh, A. M. (2008), Broadband fixed phase shifter for C-band applications. Microw. Opt. Technol. Lett., 50. – pp.396–399
- [29] J. Pedrós, F. Calle, R. Cuerdo, J. Grajal, Z. Bougrioua Voltage tunable surface acoustic wave phase shifter on AlGaIn/GaN / Applied Physics Letters, 96, 123505 (2010). – pp.1–2
- [30] Hettak, K., Ross, T. ; Gratton, D. ; Wight, J. A new type of GaN HEMT based high power high-pass/low-pass phase shifter at X band / Microwave Symposium Digest (MTT), 2012 IEEE MTT-S International, Montreal, QC, Canada, 17-22 June 2012. – pp. 1–3
- [31] TriQuint launches GaN amplifiers and GaAs phase shifters and high-power limiters // Semiconductors Today, Dec. 2013. – Available at: [http://www.semiconductor-today.com/news\\_items/2013/DEC/TRIQUINT\\_031213.shtm](http://www.semiconductor-today.com/news_items/2013/DEC/TRIQUINT_031213.shtm) (accessed 05.04.2016)
- [32] Phase shifters // TriQuint Inc., 2014. – Available at: <http://www.triquint.com/products/all/control-products/phase-shifters> (accessed 05.04.2016)
- [33] R. Vetryu GaN: Applications in RF Systems Beyond The PA // RFMD Inc., 2014. – Available at: [http://www.rfmd.com/sites/default/files/resources/migration/presentations/COMMWFA\\_RFMD\\_FINAL.pdf](http://www.rfmd.com/sites/default/files/resources/migration/presentations/COMMWFA_RFMD_FINAL.pdf) (accessed 05.04.2016)
- [34] Berroth M., et. al. High-frequency equivalent circuit of GaAs FETs for large-signal applications// IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques, 1991. – C. 224-229
- [35] Jarndal A., et. al. A new small-signal modeling approach applied to GaN devices// IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005. – C. 3440.
- [36] K.A. Filippov, A.A. Balandin "Self-Heating Effects in GaN/AlGaIn Heterostructure Field-Effect Transistors and Device Structure Optimization", Technical Proceedings of the 2003 Nanotechnology Conference and Trade Show, Vol. 3, pp. 333-336
- [37] U. Radhakrishna 'Compact transport and charge model for Gallium Nitride-based HEMTs for radio-frequency applications'-, MIT, Jun.-2013, Citable Режим доступа: <http://hdl.handle.net/1721.1/82394> (дата обращения: 19.11.2015)
- [38] A. Khakifirooz, OM Nayfeh, and D. Antoniadis 'A simple semi-empirical short-channel MOSFET current-voltage model continuous across all regions of operation and employing only physical parameters'-, IEEE Trans. Electron Devices, vol.56, no. 8, pp. 1674–1680, Aug. 2009.
- [39] Y. Chang, Y. Zhang, Y. Zhang and KY Tong 'A thermal model for static current characteristics of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors including self-heating effect'-, Journal of App. Physics., 99 (044501), 2006.
- [40] RV Langevelde, FM Klaassen 'Effect of gate-field dependent mobility degradation on distortion analysis in MOSFETs'-, IEEE Trans. Electron Devices, vol.44, no. 11, pp. 2044–2052, Nov. 1997.
- [41] Y. Tsidvidis 'Operation and modeling of the MOS transistor' –, 3 edition, Mcgraw Hill.
- [42] L. Wei, O. Mysore, and D. Antoniadis 'Virtual-Source-Based Self-Consistent Current and Charge FET Models: From Ballistic to Drift-Diffusion Velocity-Saturation Operation'-, IEEE Trans. Electron Devices, vol.59, no. 5, pp. 1263–1271, May. 2012.
- [43] U. Radhakrishna, D. Piedra, Y. Zhang, T. Palacios, D. Antoniadis 'Physics-based Compact Model of High Voltage GaN HEMTs: Experimental Verification, Field Plate Optimization and Charge Trapping'-, Electron Devices Meeting (IEDM), 2013 IEEE International , Dec. 2013.
- [44] E. Belousov, A. Timoshenko, K. Lomovskaya Survey on Designing a CAD Model for GaN HEMT Based on Measurements // Proceedings of IEEE EWDTS, Batumi, Georgia, September 26-29, 2015. – pp. 362–365.
- [45] A. Timoshenko, K. Lomovskaya, E. Belousov Radio Frequency and Signal Integrity Parameters for GaN MMIC // Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, St. Petersburg, Russia February 2-3, 2016 – pp. 495–499.
- [46] Robert V. Garver. Broad-Band Diode Phase Shifters. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 20, no. 5, May 1972.