

УДК 621.382.323

РАЗРАБОТКА НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ПСЕВДОМОРФНОГО 0.15 мкм pHEMT AlGaAs/InGaAs/GaAs ТРАНЗИСТОРА

© 2023 г. Д. Цунваза¹*, Р. В. Рыжук¹, И. С. Васильевский¹, Н. И. Каргин¹, В. А. Клоков¹¹Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Каширское шоссе, 31, Москва, 115409 Россия

*E-mail: tsdamir321@gmail.com

Поступила в редакцию 24.01.2023 г.

После доработки 15.02.2023 г.

Принята к публикации 15.02.2023 г.

В работе проводится построение нелинейной модели AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT СВЧ транзисторов с длиной затвора 0.15 мкм с применением параметрических методов анализа. При расчетах были учтены не только нелинейные источники тока, но и зависимости нелинейных емкостей затвор-исток и затвор-сток от напряжений. Показано, что предложенная модель достаточно удовлетворительно позволяет описать вольт-амперные характеристики исследуемого прибора в диапазоне токов на стоке от 0 до 100 мА и диапазоне частот от 5 до 45 ГГц. Погрешность модели не превышает 3%.

Ключевые слова: транзистор с высокой подвижностью электронов, сверхвысокий диапазон частот, библиотека элементов, AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктура, pHEMT

DOI: 10.31857/S0544126923700357, **EDN:** UEJDNX

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование монолитных интегральных схем сверхвысокочастотного диапазона (СВЧ МИС) играет большую роль при улучшении технических характеристик радиоэлектронных систем и позволяет значительно уменьшить массу и объемы аппаратуры, а также трудоемкость и себестоимость их изготовления [1, 2]. Одной из важнейших составляющих проектирования СВЧ МИС являются библиотеки элементов [3]. Для их построения требуется проведение комплексного исследования статических и частотных свойств тестовых структур (дискретные транзисторы, пассивные компоненты), позволяющее получить параметрические масштабируемые модели. Повышение точности создания моделей указанных компонент во многом упрощает процедуру разработки последующих иерархических систем на их основе.

На сегодняшний день одним из ведущих программных продуктов, используемых для дизайна и разработки радиочастотных и СВЧ устройств, является AWR DESIGN ENVIRONMENT (AWRDE) компании Cadence Design System, использующее единую объектно-ориентированную модель данных, которая синхронизирует работу над проектом, не применяя трансляторов. Для проектирования схем предусмотрена обширная библиотека схемных элементов, уже встроенных в программу. Однако имеющиеся модели требуют уточнения, связанные с особенностями технологического процесса изготовления приборов, а также его топо-

логическими параметрами. Поэтому технологический центр, ведущий разработки твердотельной СВЧ компонентной базы, должен иметь собственные уточненные модели активных и пассивных компонентов, которые являются основой норм и правил проектирования сложных интегральных устройств.

В данной работе проводится исследование транзисторов с высокой подвижностью электронов на основе AlGaAs/InGaAs/GaAs pHEMT гетероструктур с Т-образным электронно-литографическим затвором длиной 150 нм и толщиной утоненной пластины 100 мкм, выполненных по техпроцессу НИЯУ МИФИ, на основе анализа его статических и частотных свойств в диапазоне частот до 50 ГГц. Подробное описание технологического процесса изготовления экспериментальных образцов и топологии приборов представлено в работе [4]. Задача данной работы заключается в повышении точности моделей активных элементов, созданных в рамках разработки МИС малошумящего усилителя, указанной в работе [4], путем уточнения зависимости нелинейных емкостей затвор-канал от напряжения питания и смещения, а также в уточнении вольт-амперных характеристик модели.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерения ВАХ проводились на зондовой станции ручного типа Cascade Microtech PM8 с ис-

пользованием импульсного источника питания AMCAD PIV SYSTEM (ИП) в частотном диапазоне 0.1–50 ГГц. Используемая полоса измерительного фильтра (1 кГц) позволяет обеспечить достаточную равномерность амплитудно-частотной характеристики устройства для передачи сигнала почти без искажения его формы. Мощность входного сигнала (–20 dBm) выбрана из соображений снижения влияния возникающих шумовых эффектов.

На рис. 1 приведены вольтамперные и частотные характеристики экспериментального образца AlGaAs/InGaAs/GaAs транзистора с четырьмя затворными секциями шириной 50 мкм. S-параметры были измерены в диапазоне частот от 5 до 45 ГГц. Ограничение диапазона было связано с используемыми тройниками смещения Bias Tee. Показано, что транзистор обладает начальным током стока более $I_c = 250$ мА/мм и крутизной более 250 мСм/мм (рис. 1а), а также имеет величину коэффициента усиления по напряжению более 12 дБ в X диапазоне частот (рис. 1б). Разброс значений измеренных S-параметров в зависимости от расположения измеряемого образца на пластине составлял ± 1.8 дБ.

3. ЭКСТРАКЦИЯ ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРА

Методика экстракции внешних и внутренних параметров транзистора аналогична предложен-

ной в работе [5]. Для экстракции внешних и внутренних параметров транзистора использовались схемы, представленные на рис. 2. При этом для экстракции внешних параметров использовалась схема, альтернативная методу “Open-Short” [6], которая позволяет проводить извлечение параметров без изменения ее конфигурации, сокращая затраты на экспериментальные исследования (рис. 2а). Использование программного обеспечения AWR Design Environment позволяет проводить расчеты в открытом и закрытом состояниях канала транзистора без изменения конфигурации схемы.

На рис. 3 представлена теоретически рассчитанная частотная зависимость проводимости транзистора в закрытом состоянии. Наблюдаемые резонансы на частотах 28.5 и 45 ГГц связаны с наличием в цепи LC- и RC-участков. В частности, емкость канала (C4 и C5 на рис. 2а) влияет на оба резонанса, а индуктивности затворной (L1) и стоковой (L2) областей – на величину и положение резонансов в основном более высоких частот. Емкость затворной области (C3) практически не влияет на характеристики рассматриваемых пиков, а емкости области затвор-контакт (C1) и сток-контакт (C2) оказывают в значительной степени влияние только на положение пиков и незначительно на их величину. Погрешность модели составляет 4% во всем исследуемом диапазоне частот.

Внутренние параметры транзистора определялись путем решения следующего уравнения [7]:

$$\begin{bmatrix} i_{gs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{gs} + Y_{gd} & Y_{gd} \\ \underbrace{g_m + j\omega C_m - Y_{gd}}_{Y_{int}} & Y_{ds} + Y_{gd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{gs} \\ v_{ds} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где

$$Y_{gs} = \frac{j\omega C_{gs}}{1 + j\omega C_{gs} R_i} \quad (2)$$

$$Y_{gd} = \frac{j\omega C_{gd}}{1 + j\omega C_{gd} R_j} \quad (3)$$

$$Y_{ds} = j\omega C_{ds} + g_{ds}. \quad (4)$$

Подставляя выражения (2), (3) и (4) в (1), было получено выражение для внутреннего адмиттанса:

$$Y_{int} = \begin{bmatrix} j\omega(C_{gs} + C_{gd}) & -j\omega C_{gd} \\ g_m + j\omega(C_m - C_{gd}) & g_{ds} + j\omega(C_{gs} + C_{gd}) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

4. РАЗРАБОТКА НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ

При разработке нелинейной модели были рассмотрены различные модели транзисторов, используемые в коммерческих САПР, включая модель Ангелова [8], квадратичную и кубическую

модели Куртиса [9, 10], модель Чалмерса [11], модифицированную модель Матерка [12] и модель Иланда [13]. По результатам предварительных исследований было установлено, что наибольшей схожимостью в нашем случае обладает модель Чалмерса, поэтому она была использова-

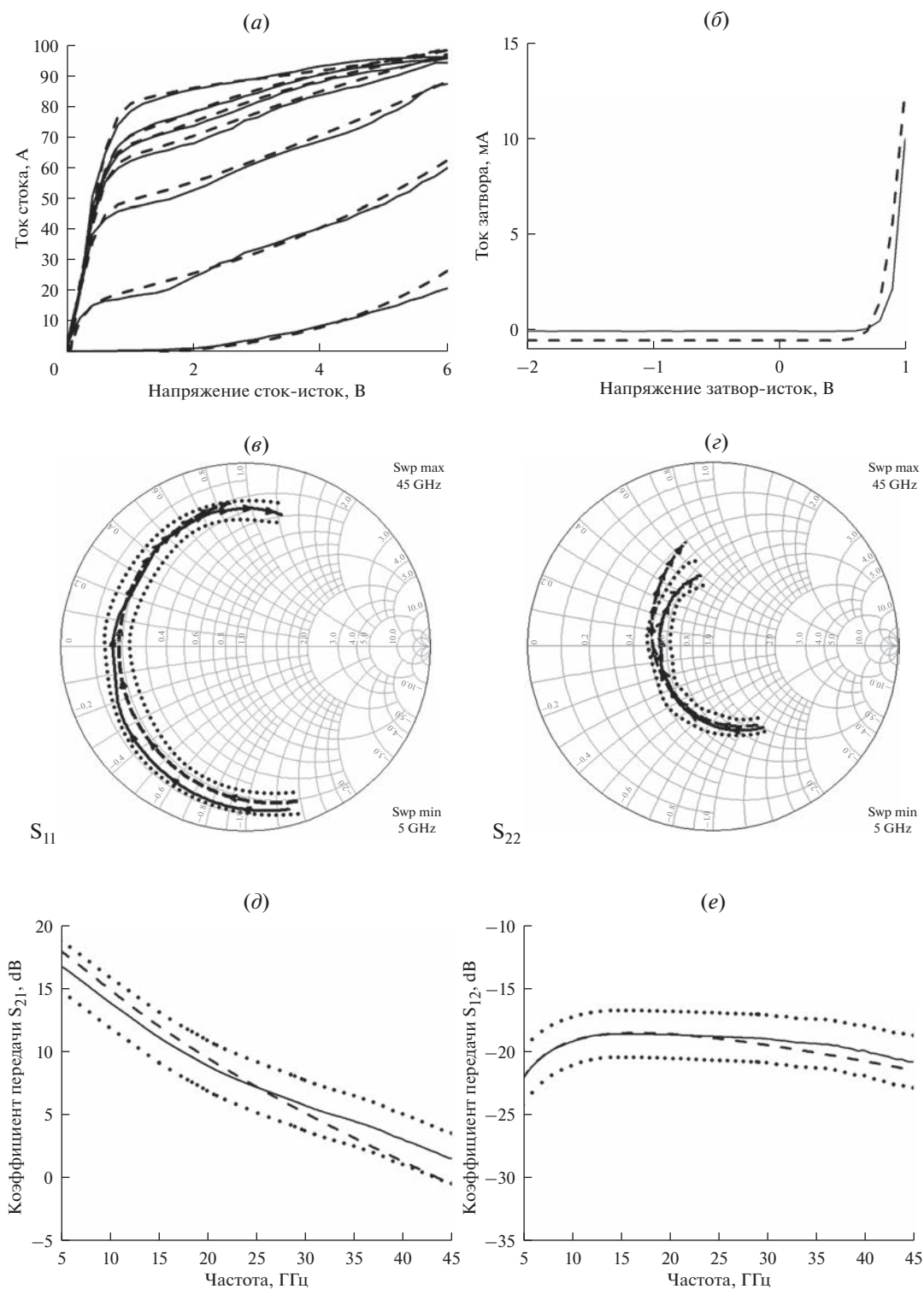


Рис. 1. Характеристики экспериментального образца: выходная ВАХ при $U_{зи}$ от -0.3 до 1 В (а), затворная ВАХ при $U_{си} = 0$ В (б); S-параметры, измеренные при $U_{зи} = -0.3$ В и $U_{си} = 3.2$ В в диапазоне частот $5\text{--}45$ ГГц (в–е). Сплошными линиями представлены типовые экспериментальные результаты, мелкими точками на результатах S-параметров отмечены границы диапазона экспериментальных данных, полученные в различных областях пластины, пунктирными – рассчитанные значения.

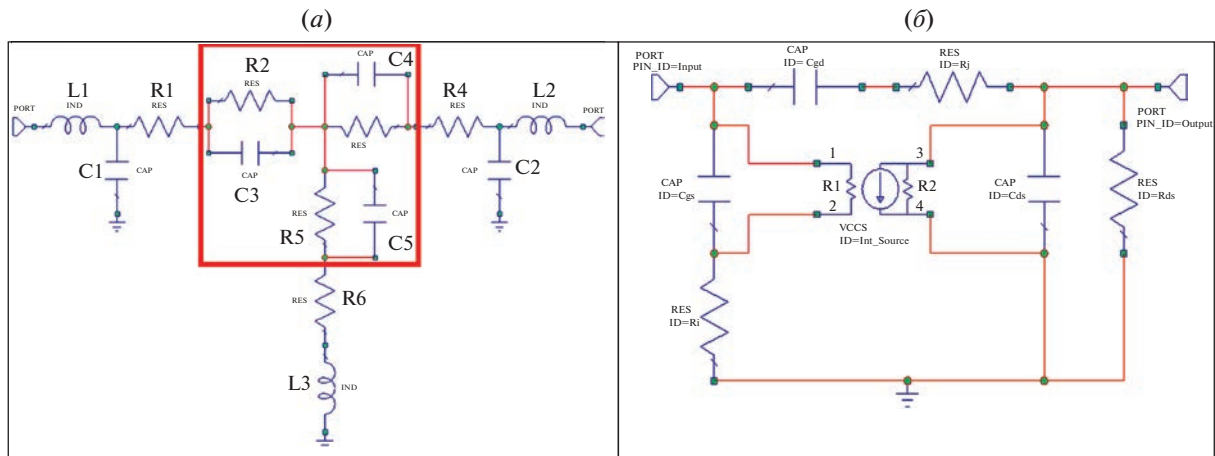


Рис. 2. Принципиальные схемы для экстракции параметров транзистора: (а) для внешних параметров (область, выделенная квадратом, имитирует канал транзистора); (б) для внутренних параметров.

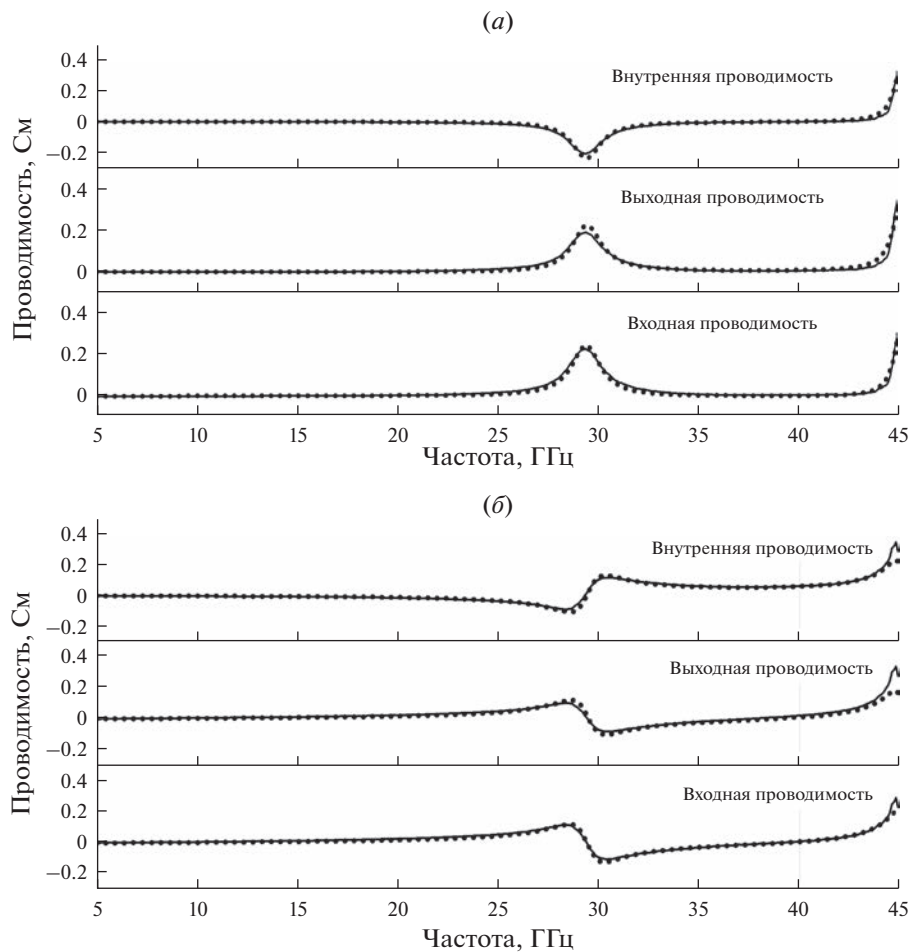


Рис. 3. Теоретически рассчитанные частотные зависимости проводимости транзистора в закрытом канале: (а) действительная часть, (б) мнимая.

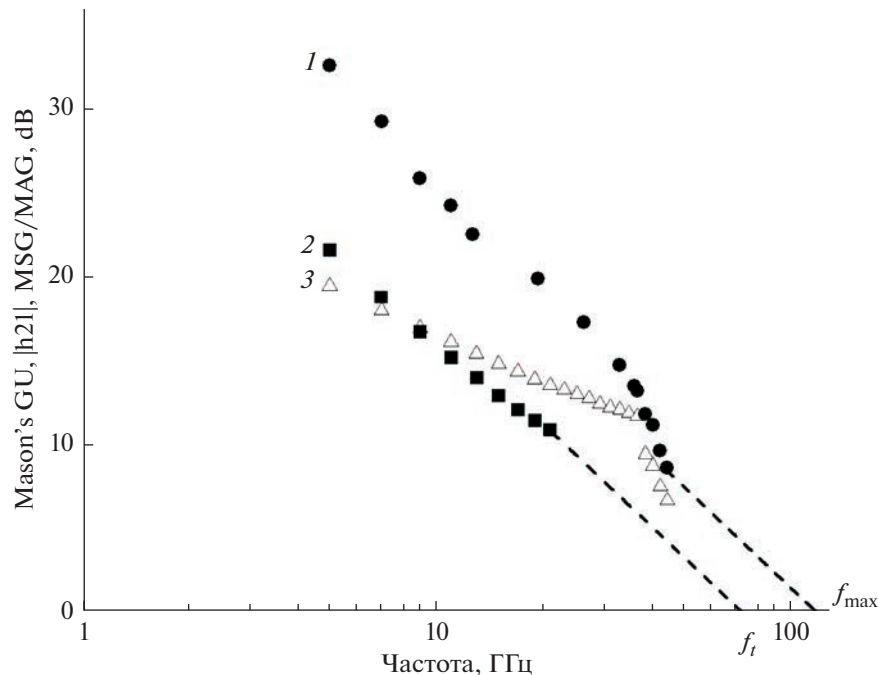


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента усиления Масона (кривая 1), модуля коэффициента передачи по току $|h_{21}|$ (кривая 2) и максимально достижимого/стабильного коэффициента усиления по мощности MAG/MSG (кривая 3). Маркерами приведены экспериментальные данные типовой характеристики, пунктирной линией – рассчитанные значения.

$$I_g = I_{gss} \left(\exp \left(q \frac{V_{gs} - V_{th}}{N_{gs} k T} \right) - 1 \right), \quad (12)$$

где q – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, T – температура окружающей среды.

Рассчитанные значения коэффициентов, полученные на основе анализа выражений (6)–(12), представлены в табл. 1.

На рис. 1 пунктирными кривыми представлены теоретически рассчитанные зависимости ВАХ и АЧХ транзистора, полученные с использованием приведенных выражений и коэффициентов из табл. 1. Полученные значения достаточно удовлетворительно позволяют охарактеризовать базовые транзисторы. Наблюдаемые незначительные отклонения теоретических кривых от экспериментальных значений на ВАХ и S_{22} не превышают 3%. Погрешность модели может быть связана с до-

полнительными реактивными компонентами в выходной цепи транзистора, а также влиянием “кинк-эффекта” в области малых напряжений стока на ток прибора.

По полученным данным в указанных диапазонах тока стока и напряжения сток-исток были рассчитаны частотные характеристики коэффициента усиления Масона, модуля коэффициента передачи по току $|h_{21}|$ и максимально достижимого/стабильного коэффициента усиления по мощности MAG/MSG (maximum available gain/maximum stable gain), представленные на рис. 5.

Граничные частоты усиления по току и по мощности были определены путем стандартных экстраполяций частотных зависимостей $|h_{21}|$ и ко-

Таблица 1. Параметры источников тока

Параметр	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	B_1	B_2	α_R	α_S
Значение	5.716	−7.821	16.2	−22.16	12.94	0	−0.448	0.288	4.576	−0.0025
Параметр	I_{pk}	V_{TR}	λ	λ_{SB}	V_{pk0}	V_{pks}	V_{SB2}	I_{gss}	V_{th}	N_{gs}
Значение	0.043	33.89	0.0174	−11.4	−0.096	14.92	1×10^{-4}	1.1×10^{-4}	0.7	2.43

эфициента Масона к более высоким частотам. Показано, что для рассматриваемого транзистора эти значения составили $f_i = 75$ ГГц и $f_{\max} = 103$ ГГц соответственно. При этом величина максимально достижимого коэффициента усиления по мощности на частоте 10 ГГц составила 17 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная нелинейная модель псевдоморфного 0.15 мкм рНЕМТ AlGaAs/InGaAs/GaAs транзистора позволила охарактеризовать прибор в диапазоне напряжений на стоке до 6 В, а также его передаточную характеристику в диапазоне частот 5–45 ГГц. Параметризация транзистора проведена на основе уточненной модели Чалмерса. Показано, что предложенная модель достаточно удовлетворительно позволяет описать вольт-амперные характеристики исследуемого прибора в диапазоне токов на стоке от 0 до 100 мА, а также в частотном диапазоне от 5 до 45 ГГц. Погрешность модели не превышает 3%. Рассматриваемый диапазон токов и напряжений является рабочим для выбранного транзистора, поэтому полученные результаты могут быть использованы при построении библиотеки элементов активных СВЧ компонентов на основе используемых псевдоморфных гетероструктур соединений $A^{III}B^V$.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при содействии Фонда поддержки образования и науки имени члена-корреспондента РАН, профессора В.Г. Мокерова с использованием оборудования центра коллективного пользования НИЯУ МИФИ “Гетероструктурная СВЧ-электроника и физика широкозонных полупроводников”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Devon T. Donahue et al.* An X/Ku Dual-Band GaAs MMIC Power Amplifier with Integrated Load Impedance Sensing / 2022 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium – IMS, 2022.
2. *Zhong Wang et al.* Review of Ka-Band Power Amplifier / Electronics. 2022. V. 11. № 942.
3. *Добуш И.М.* Построение моделей пассивных элементов и автоматизированное проектирование СВЧ монолитных усилителей с учетом влияния температуры. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, ТУСУР, Томск, 2012.
4. *Васильевский И.С. и др.* Разработка отечественного техпроцесса 0.15 мкм РНЕМТ для МИС СВЧ МШУ / Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем. Омск, 26–27 апреля 2022 г.
5. *Gorelov A.A. et al.* Parametrization of a Microwave and the Noise Model of a Metamorphic 0.15 μm MHET In-AlAs/InGaAs Transistor / Russian Microelectronics. 2021. P. 170–177.
6. *Добуш И.М.* Исследование методов деэмбединга “Open”, “Open-Short”, “Open-Short-Thru” для зондовых измерений параметров рассеяния элементов СВЧ-монолитных интегральных схем / Доклады ТУСУРа. № 4 (34), декабрь 2014. С. 138–145.
7. *Prasad A.* Nonlinear Modeling of FETs for Microwave Switches and Amplifiers, Thesis for The Degree of Doctor of Philosophy, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2017.
8. *Angelov I., Bengtsson L., Garcia M., van Raay F., Kompa G.* Extensions and model verification of the Chalmers Nonlinear HEMT and MESFET Model, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 1996, V. 44. № 10. P. 1664–1674.
9. *Curtice W.* A MESFET Model for Use in the Design of GaAs Integrated Circuits, IEEE Trans. Microw. Theory Techn. May 1980. V. 28. № 5. P. 448–456.
10. *Curtice W., Eddenberg M.* A Nonlinear GaAs FET Model for Use in the Design of Output Circuits for Power Amplifiers, IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1985. V. 33. № 12. P. 1383–1394.
11. *Angelov I., Zirath H., Rosman N.* A New Empirical Nonlinear Model for HEMT and MESFET Devices, IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1992. V. 40. № 12. P. 2258–2266.
12. Keysight Technologies, Modified Materka GaAs-FET Model. URL: <http://edadocs.software.keysight.com/pages/viewpage.action?pageId=10745514>
13. *Yhland K., Rorsman N., Garcia M., Merkel H.* A Symmetrical Nonlinear HFET/MESFET Model Suitable for Intermodulation Analysis of Amplifiers and Resistive Mixers, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2000. V. 48. № 1. P. 15–22.
14. MauryMicrowave, AMCAD Engineering. MT930M1/M2A – HEMT Compact Model Extractor.