

ВОССТАНОВЛЕНИЕ МОДЕЛИ GaN ТРАНЗИСТОРА ДЛЯ РАБОТЫ НА БОЛЬШОМ СИГНАЛЕ

© И. С. Бенуни¹, Е. А. Валамин¹, В. М. Миннебаев^{1,2}, А. Ю. Евграфов¹,
С. В. Миннебаев¹, А. М. Зубков¹

¹АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

²ФГБОУВО «Московский технологический университет» (МИРЭА),
119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78

Разработана методика экстракции параметров эквивалентной схемы HEMT транзистора. На основе восстановленной модели спроектированы и изготовлены усилители мощности X-диапазона. Получено совпадение параметров усилителей мощности, рассчитанных при моделировании на малом и большом сигнале, с измеренными значениями.

Ключевые слова: GaN транзисторы, нелинейная модель транзистора, тепловые эффекты при измерениях, экстракция параметров, эквивалентная схема

Сведения об авторах: Бенуни Игорь Суренович, аспирант, benuni_is@pulsarnpp.ru; Валамин Евгений Александрович, аспирант, valamin_ea@pulsarnpp.ru; Миннебаев Вадим Минхатович, к.т.н., mail6@pulasnpp.ru; Евграфов Александр Юрьевич; Миннебаев Станислав Вадимович, minnebaev_sv@pulsarnpp.ru; Зубков Александр Михайлович, к.т.н., zubkov_am@pulsarnpp.ru

EXTRACTION OF GaN TRANSISTOR MODEL FOR LARGE SIGNAL OPERATION

I. S. Benuni¹, E. A. Valamin¹, V. M. Minnebaev^{1,2}, A. Yu. Evgrafof¹,
S. V. Minnebaev¹, A. M. Zubkov¹

¹JSC «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okruzhnoy proezd, 27

²Moscow Technological University (MIREA), 119454, Moscow, Vernadskogo avenue, 78

In this paper, the method for parameter extraction of HEMT equivalent circuit was developed. X-band power amplifiers were designed and manufactured based on extracted model. During small and large signal simulations, values of power amplifier parameters were obtained, which coincide with the measured ones.

Keywords: GaN HEMT, nonlinear transistor model, thermal effects in measurements, parameter extraction, equivalent circuit

Data of authors: Benuni Igor Surenovich, postgraduate, benuni_is@pulsarnpp.ru; Valamin Evgeniy Aleksandrovich, postgraduate, valamin_ea@pulsarnpp.ru; Minnebaev Vadim Minkhatovich, Ph.D., mail6@pulasnpp.ru; Evgrafof Aleksandr Yurievich; Minnebaev Stanislav Vadimovich, minnebaev_sv@pulsarnpp.ru; Zubkov Aleksandr Mikhailovich. Ph.D., zubkov_am@pulsarnpp.ru

Введение

В настоящее время при проектировании СВЧ устройств повсеместно применяются системы автоматизированного проектирова-

ния (САПР). Разработка компьютерной модели устройства с целью расчёта его структуры, используемых элементов и режимов работы для достижения необходимых характеристик устройства является важной частью

разработки любого СВЧ прибора. В большинстве САПР для расчёта электрических параметров прибора используются модели компонентов, из которых данный прибор сконструирован (модели микрополосковых линий, транзисторов, диодов, SMD-компонентов). При этом в САПР необходимо использовать модели компонентов, отвечающие компонентам, используемым в реальном приборе. От корректности данной модели зависит точность совпадения характеристик изготовленного образца и его компьютерного расчёта. Очевидно, что чем точнее разработанная модель описывает работу компонента в СВЧ приборе, тем точнее будет совпадение расчётных характеристик спроектированного прибора с его характеристиками при изготовлении, что позволит избежать дополнительной настройки уже готового устройства и существенно уменьшит время проектирования. Фактически, предварительное компьютерное моделирование работы устройства является неотъемлемой частью его проектирования. Следовательно, и существование компьютерной модели прибора САПР является обязательной составляющей для его использования при изготовлении СВЧ устройств.

Современные производители полупроводниковой и СВЧ электроники имеют библиотеки компьютерных моделей компонентов, производимых ими, для использования в различных САПР. Данные библиотеки позволяют заказчику самостоятельно проектировать необходимое ему устройство по технологиям производителя (как отдельные

платы СВЧ устройств, так и сложные функциональные блоки), а производитель занимается его изготовлением. При этом технологии и компоненты могут быть различны. Например, фирмы «TriQuint Semiconductors» (США) [1] и «Cree» (США) [2] вместе с транзисторами поставляют и их модели, которые в дальнейшем используются при проектировании гибридных интегральных схем уже непосредственно заказчиком. В свою очередь «UMS» (Франция) и «WIN Semiconductors Inc.» (Тайвань) поставляют пакет, позволяющий проектировать монолитные интегральные схемы по их технологиям для дальнейшего производства на их фабриках. Российские компании, например, «AlphaCHIP» – (г. Зеленоград) [3] и «Тезис-Интехна» (г. Воронеж) [4] проводят разработку библиотек элементов цифровых ИС на заказ.

В рамках программы импортозамещения на АО «НПП «Пульсар» изготовлен гетероструктурный HEMT транзистор на структуре AlGaN/GaN. Данная работа посвящена восстановлению его модели на основе эквивалентной схемы для САПР AWR Microwave Office с целью использования в дальнейшем при проектировании СВЧ усилителей мощности X-диапозона.

Измерительная установка

В данной работе для восстановления эквивалентной схемы транзистора, внешний вид которого приведён на рис. 1, проводились измерения его вольт-амперных характеристик (ВАХ) и S-параметров.

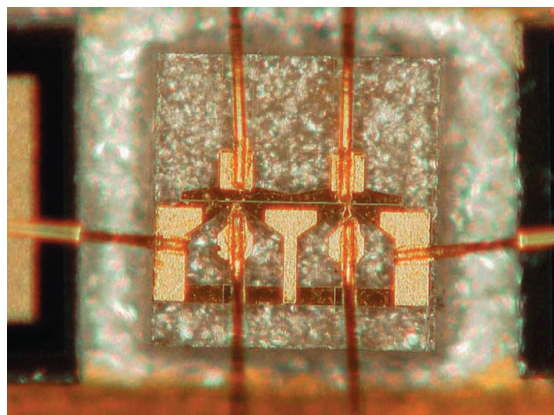


Рис. 1

Внешний вид исследуемого транзистора

На рис. 2 приведён внешний вид установки для измерения S-параметров транзистора. Она состоит из зондовой станции Cascade Microtech и анализатора цепей E507C. Измерения проводились на зондах фирмы Z-probe.

В виду отсутствия возможности непосредственного подключения зондов к прибору при измерении S-параметров была использована специальная плата, позволяющая осуществить переход «микрополосок-компланар» [5]. При этом калибровка измерительной установки производилась по типу SOLT, с учётом влияния переходной платы и разварочных проволок. Таким образом, после калибровки на анализаторе цепей можно определить S-параметры в сечении транзистора.

На рис. 3 приведён внешний вид установки для измерения ВАХ транзистора. Она состоит из аналогичной зондовой станции и измерителя характеристик полупроводниковых приборов Agilent E1500A. Измерения также проводились с использованием платы «микрополосок-компланар». Для предотвращения самовозбуждения при измерениях транзистор устанавливался на диэлектрический брусок.

Метод восстановления эквивалентной схемы

Цель данной работы состояла в восстановлении нелинейных зависимостей элементов эквивалентной схемы по изме-

рениям параметров транзистора. Используемую эквивалентную схему транзистора (рис. 4) можно разбить на две части: внешнюю, которая включает в себя паразитные элементы, связанные с контактами транзистора и подложкой, и внутреннюю, состоящую из источника тока, управляемого напряжением, и ёмкостей гетероструктуры.

На рис. 4 изображены R_g, L_g, C_{pg} – паразитные ёмкость, индуктивность и сопротивление затвора; R_d, L_d, C_{pd} – паразитные ёмкость, индуктивность и сопротивление стока; R_s, L_s – паразитные сопротивление и индуктивность истока; R_i, R_{gs}, C_{gs} – внутренние сопротивления и ёмкость перехода затвор-исток; R_j, R_{gd}, C_{gd} – внутренние сопротивления и ёмкость перехода сток-затвор; C_{ds} – ёмкость сток-исток; I_{ds} – эквивалентный источник тока; G_d – проводимость

Процесс восстановления эквивалентной схемы разбивается на три последовательных этапа:

1. восстановление (ВАХ) транзистора;
2. восстановление внешней части эквивалентной схемы;
3. восстановление внутренней части эквивалентной схемы.

Восстановление ВАХ осуществлялось путём её измерения в импульсном режиме. Для восстановления остальных элементов эквивалентной схемы использовались измерения S-параметров. Так как в рамках работы не рассматриваются температур-

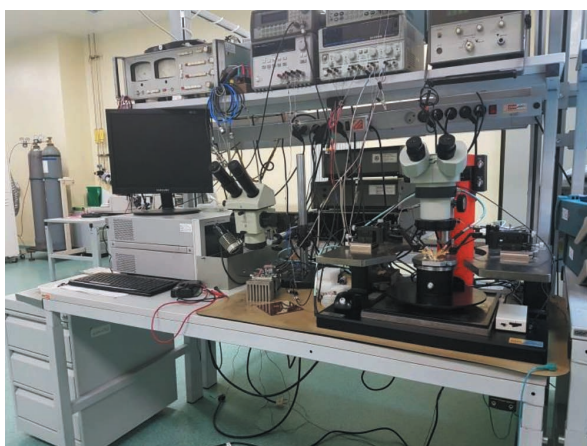


Рис. 2

Внешний вид установки измерения S-параметров

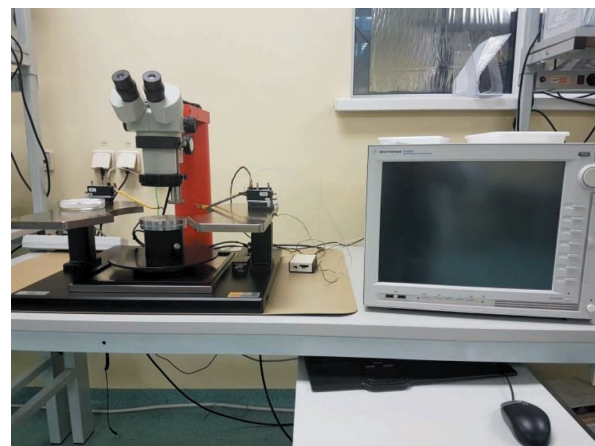


Рис. 3

Внешний вид установки для измерения вольт-амперных характеристик транзистора

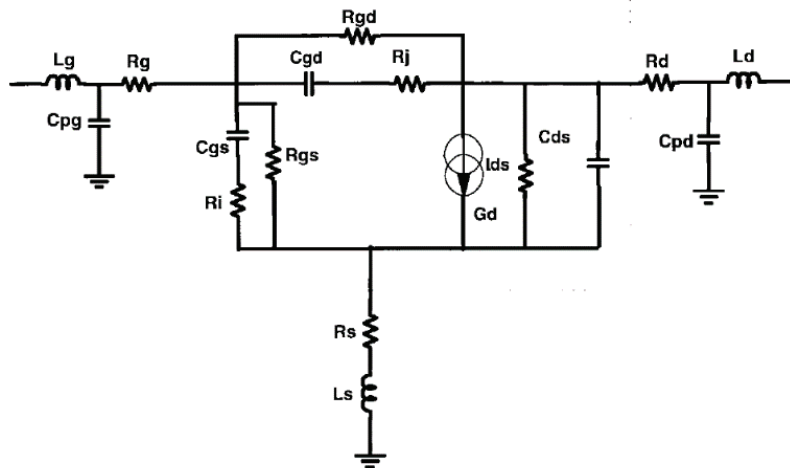


Рис. 4

Эквивалентная схема транзистора

ные зависимости параметров транзистора, то было необходимо подобрать такие условия измерений, при которых не наблюдается влияние температурных эффектов. Рассмотрим подробнее каждый этап.

При измерении ВАХ основное влияние на их форму оказывают следующие эффекты:

1. эффект перезарядки ловушек;
2. эффект саморазогрева транзистора на постоянном токе;
3. начальные значения напряжения затвора и стока.

В ходе измерений были экспериментально подобраны длительность импульса ≈ 1 мкс и начальные значения напряжений, при котором влияние данных эффектов минимально. Данные измерения позволили получить ВАХ транзистора, работающего на большой частоте при малом перегреве. Для данного транзистора в усилителе мощности такой режим работы может быть реализован при работе усилителя со скважностью $Q = 10$. Для аппроксимации ВАХ использовалось следующее стандартное выражение модели Ангелова [6]:

$$I_d(V_g, V_d) = IPK(1 + \tanh(\psi)) \tanh(\alpha V_d) (1 + \lambda * V_d),$$

$$\psi = P_1(V_g - V_{pk}) + P_2(V_g - V_{pk})^2 + P_3(V_g - V_{pk})^3 + \dots,$$

$$\alpha = \alpha_r + \alpha_s (1 + \tanh(\psi)),$$

$$V_{pk} = V_{pk0} + (V_{pks} - V_{pk0}) \tanh(\alpha_s * V_d), \quad (1)$$

где V_g – напряжение затвор-исток, V_d – напряжение сток-исток, I_d – ток стока, IPK , P_1 , P_2, P_3 , α_r , α_s , V_{pk0} , V_{pks} – коэффициенты аппроксимации.

Коэффициенты выражения (1) находились методом оптимизации. Оптимизация проводилась для двух зависимостей: для зависимости тока стока от напряжения на затворе при 28 В на стоке, которые являются основной рабочей точкой GaN транзисторов в режиме работы на большом сигнале, и для всей ВАХ. В качестве оптимизирующего критерия использовалась минимизация среднеквадратичного отклонения аппроксимирующей функции от результатов измерений. После этого проводилась дополнительная ручная корректировка значений с целью улучшить совпадение измеренных и смоделированных ВАХ (рис. 5). Наблюдаемое несовпадение зависимости тока стока от напряжения стока ниже 5 В отнесём к недостатку данной модели, который пренебрежимо мал, так как в мощных усилителях транзистор не работает на данном участке ВАХ.

Для восстановления внешних и внутренних элементов эквивалентной схемы использовались измерения S-параметров.

Данная методика представлена во многих статьях [7-9] и является стандартной при восстановлении эквивалентных схем транзисторов. S-параметры транзистора измерялись в трёх режимах:

1. режим закрытого транзистора ($U_g < -4$, $U_d = 0$);
2. «холодный» режим ($U_g = 0$, $U_d = 0$);
3. рабочий режим ($U_g > -3$, $U_d > 0$).

Первый и второй режим измерений используются для нахождения паразитных параметров транзистора. Из измерения S-параметров закрытого транзистора находятся паразитные ёмкости:

$$\omega C_{pd} = \text{Im}(Y_{11}) + 2\text{Im}(Y_{12}),$$

$$\omega C_{pg} = \text{Im}(Y_{22}) + \text{Im}(Y_{12}), \quad (2)$$

где C_{pd} – паразитное сопротивление стока, C_{pg} – паразитное сопротивление затвора.

Видно, что ёмкости находятся как угол наклона экспериментальных данных на высоких частотах, где наблюдается линейная зависимость проводимости от частоты.

Значения паразитных индуктивностей и сопротивлений определяется из измерений в «холодном» режиме:

$$Z_{11} = R_s + R_g + R_c/2 + j\omega(L_s + L_g),$$

$$Z_{12} = Z_{21} = R_s + R_c/2 + j\omega L_s,$$

$$Z_{22} = R_s + R_g + R_d + j\omega(L_s + L_d), \quad (3)$$

где R_g, L_g – паразитные ёмкость, индуктивность и сопротивление затвора; R_d, L_d – паразитные ёмкость, индуктивность и сопротивление стока; R_s, L_s – паразитные сопротивление и индуктивность истока.

Из приведённых выше выражений следует, что индуктивности находятся из линейных зависимостей мнимых частей. Сопротивления контактов определяются в области, где вещественная часть импеданса не зависит от частоты.

Следует обратить внимание на важный момент, возникающий на данном этапе. Так как сопротивления стока, затвора и истока влияют на ВАХ транзистора, то после их нахождения и подстановки в схему транзистора необходимо провести перерасчёт коэффициентов (1).

Для определения параметров внутренней части схемы используются S-параметры в активном режиме. Классически производится процедура извлечения паразитных параметров (de-embedding), при которой из измеренных параметров вычитается влияние внешней части схемы и остаются Y-параметры внутренней части. Полученные Y-параметры позволяют найти эффективные значения номиналов элементов внутренней схемы в заданной рабочей точке. В случае малого сигнала на транзисторе

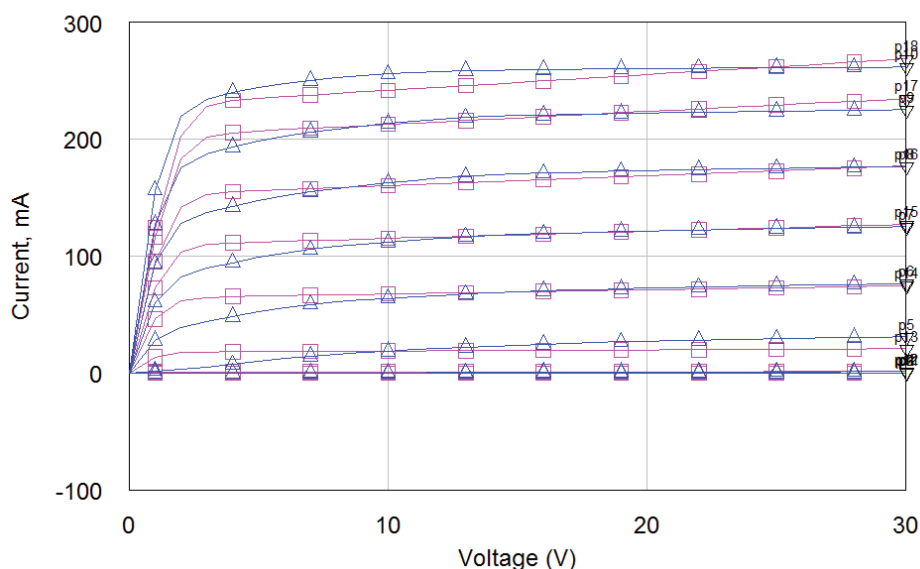


Рис. 5

Сравнение измеренных и смоделированных ВАХ (синие кривые – измеренные значения; красные кривые – значения, полученные в результате моделирования)

(≈ 20 dBm) можно считать, что эффективные значения элементов эквивалентной схемы равны значениям элементов при напряжениях на стоке и затворе, равным напряжениям рабочей точки. Для нахождения значений внутренних элементов используются следующие выражения:

$$\begin{aligned}
 Y_{11} &= \frac{R_i C_{gs}^2 \omega^2}{D_1} + \frac{1}{R_{gs}} + \frac{R_i C_{gd}^2 \omega^2}{D_2} + \frac{1}{R_{gd}} + \\
 &+ j\omega \left(\frac{C_{gs}}{D_1} + \frac{C_{gd}}{D_2} \right), \\
 Y_{12} &= -\frac{R_j C_{gd}^2 \omega^2}{D_d} - \frac{1}{R_{gd}} - j\omega \frac{C_{gd}}{D_2}, \\
 Y_{21} &= \frac{G_m e^{-j\omega\tau}}{1 + j\omega R_i C_{gs}} - \frac{R_j C_{gd}^2 \omega^2}{D_2} - \frac{1}{R_{gd}} - j\omega \frac{C_{gd}}{D_2}, \\
 Y_{22} &= G_d + \frac{R_j C_{gd}^2 \omega^2}{D_2} + \frac{1}{R_{gd}} + j\omega \left(C_{ds} + \frac{C_{gd}}{D_2} \right), \\
 D_1 &= 1 + R_i^2 C_{gs}^2 \omega^2, \\
 D_2 &= 1 + R_j^2 C_{gd}^2 \omega^2,
 \end{aligned} \tag{4}$$

где R_{gd} , R_i , R_j , R_{gs} , C_{gs} – внутренние сопротивления и ёмкость перехода затвор-исток; C_{gd} – ёмкость перехода сток-затвор; C_{ds} – ёмкость сток-исток; G_m – крутизна ВАХ, τ – постоянная времени транзистора.

На графиках ниже приведены измеренные и смоделированные значения Y-параметров для различных рабочих точек транзистора. На рис. 6 приведён график тока потребления транзистора от напряжения на стоке. Будем считать, что уменьшение тока стока при росте напряжения на стоке свидетельствует о разогреве транзистора. При этом уменьшается крутизна ВАХ прибора и изменяется наклон ВАХ. На рис. 7 приведено сравнение измеренного и смоделированного S_{21} для положительного и отрицательного наклона ветки ВАХ. Таким образом, можно сделать вывод, что при изучении работы транзистора даже на малом сигнале необходимо учитывать влияние на его работу тепловых эффектов.

К сожалению, установка не позволяет учесть тепловые эффекты при работе прибора, что не позволяет напрямую оптимизировать совпадение зависимостей по среднеквадратичному отклонению. По этой причине в качестве критерия оптимума использовалось совпадение точек экстремума и точек нуля Y-параметров транзистора. Для того, чтобы данные точки имелись на графике, пришлось отказаться от вычитания влияния внешней части схемы и аппроксимировать выражения с учётом влияния внешних элементов, найденных на предыдущем шаге. В итоге данного этапа нами были найдены значения внутренних сопротивлений, не зависящих от напряжений на контактах транзистора, и значения нелинейных ёмкостей для каждой рабочей точки.

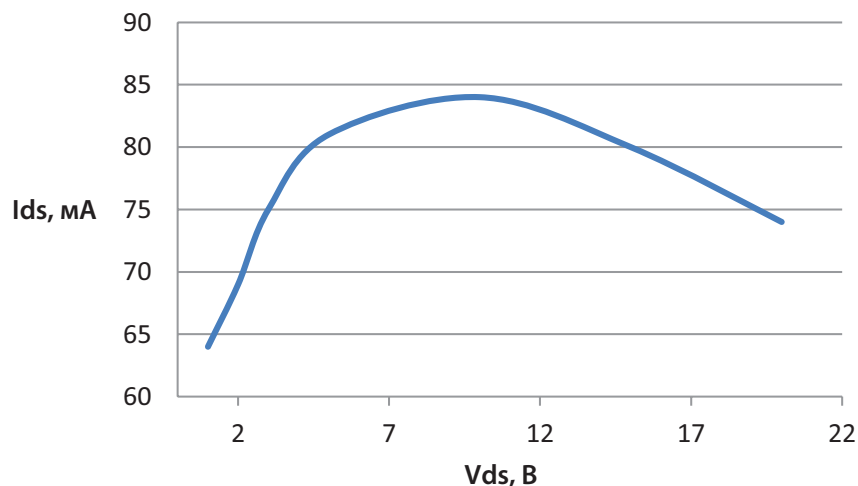


Рис. 6

Зависимость тока потребления транзистора от напряжения сток-исток.
Напряжение затвор-исток – 2 В

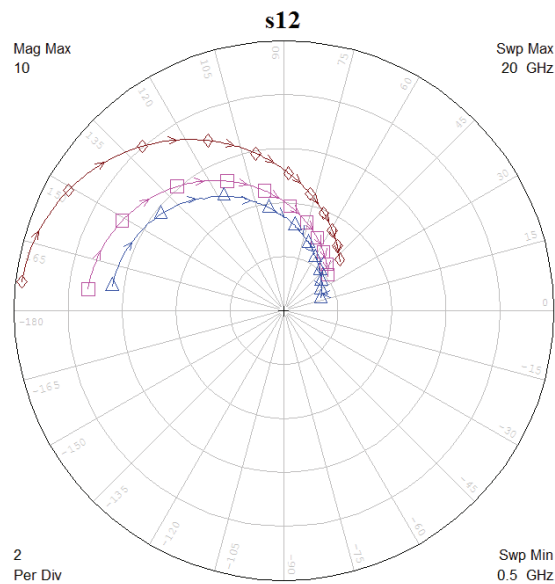


Рис. 7

Влияние разогрева транзистора на S-параметры (синяя кривая – измеренные S-параметры; розовая кривая – смоделированные S-параметры при отрицательном наклоне ВАХ; коричневая кривая – смоделированные S-параметры при измеренных ВАХ)

Последний этап восстановления внутренней части эквивалентной схемы заключается в учёте зависимостей ёмкостей затвор-сток C_{gd} и затвор-исток C_{gs} от напряжения на выходах транзистора. Для описания зависимостей ёмкостей C_{gd} и C_{gs} от напряжений V_{gs} и V_{gd} используются следующие выражения:

$$C_{gs} = CGS0 (1 + \tanh(PC20 + PC21 V_d)) \tanh(PC10 + PC11 V_g),$$

$$C_{gd} = CGD0 (1 + \tanh(PC30 + PC31 V_d)) \tanh(PC40 + PC41 * V_{gd}), \quad (5)$$

где $CGS0$, $PC20$, $PC21$, $PC10$, $PC11$, $CGD0$, $PC30$, $PC31$, $PC40$, $PC41$ – коэффициенты аппроксимации.

Коэффициенты находились путём оптимизации по минимуму среднеквадратичного отклонения. На рис. 8 и рис. 9 приведены получившиеся зависимости.

В результате была восстановлена нелинейная эквивалентная схема транзистора. Для оценки корректности работы разработанной модели транзистора был спроектирован тестовый усилитель

и произведено сравнение его рассчитанных и измеренных характеристик.

Верификация модели

Оценка корректности полученной модели проводилась по сравнению рассчитанных и измеренных характеристик усилителя, разработанного на её основе (рис. 10).

Для расчёта характеристик усилителя использовалась среда AWR Microwave Office. Электромагнитный расчёт плат согласования производился в AXIEM. Ниже приведены графики сравнения рассчитанных и измеренных зависимостей КСВ по входу и коэффициента передачи для данного усилителя (рис. 11-13). Коэффициенты передачи приведены для двух значений входной мощности, отвечающих большому и малому сигналу для данного транзистора. Из опыта разработок усилителей на транзисторах с аналогичной шириной затвора, было найдено, что эффекты разогрева транзистора не оказывают сильное влияние на его характеристики при скважности сигнала $Q > 10$. Из сравнения приведённых зависимостей видно, что наблюдается совпадение измеренных и рассчитанных параметров усилителя.

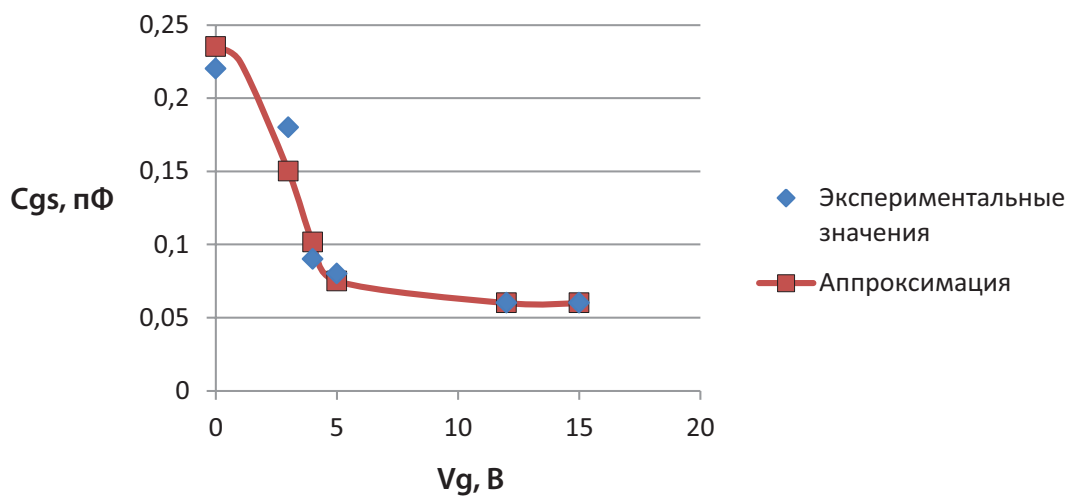


Рис. 8

Зависимость ёмкости затвор-исток от напряжения на затворе

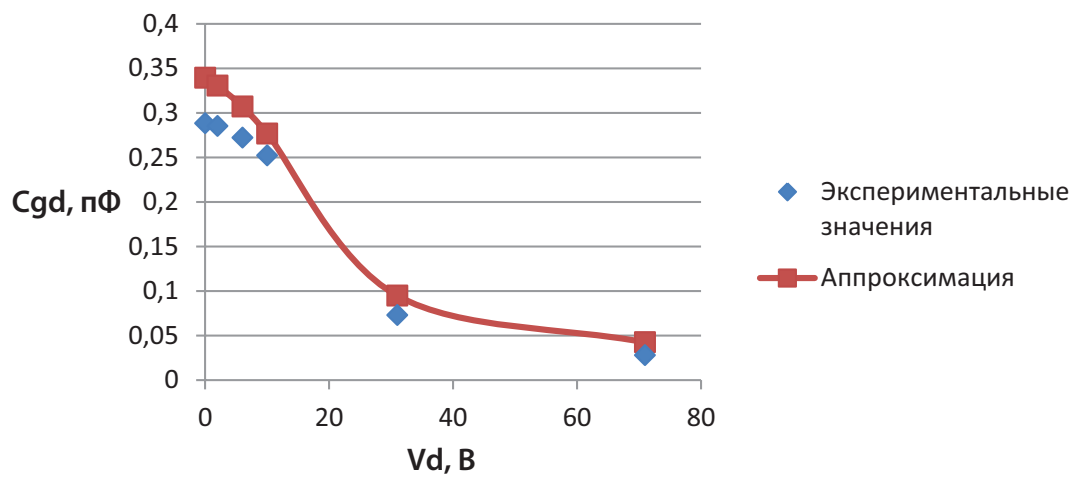


Рис. 9

Зависимость ёмкости сток-затвор от напряжения на стоке

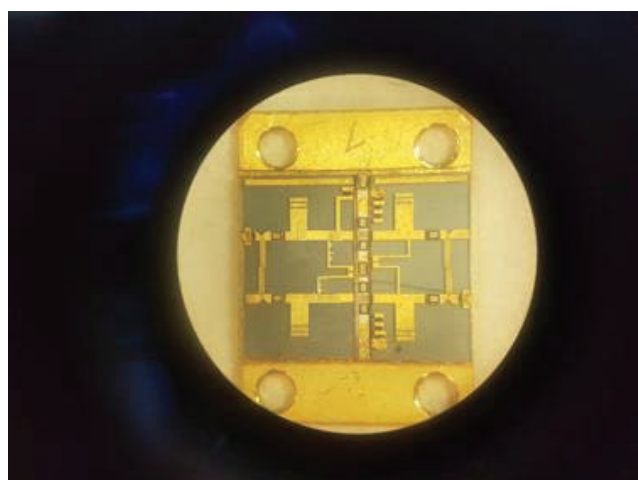


Рис. 10

Внешний вид тестового усилителя X-диапазона

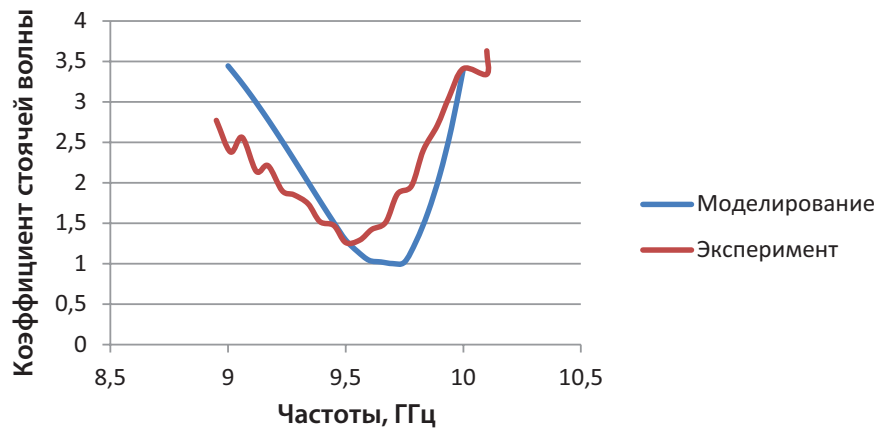


Рис. 11

Сравнение смоделированных и экспериментальных КСВ усилителя

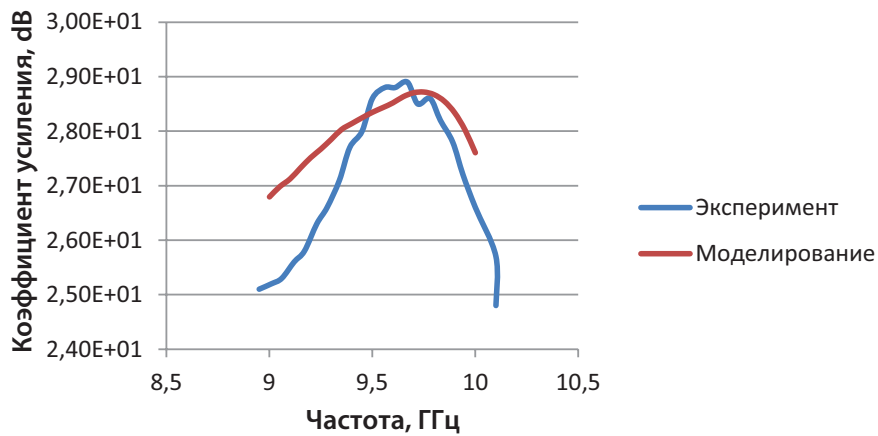


Рис. 12

Сравнение смоделированного и экспериментального коэффициента усиления при 0 дВт на входе

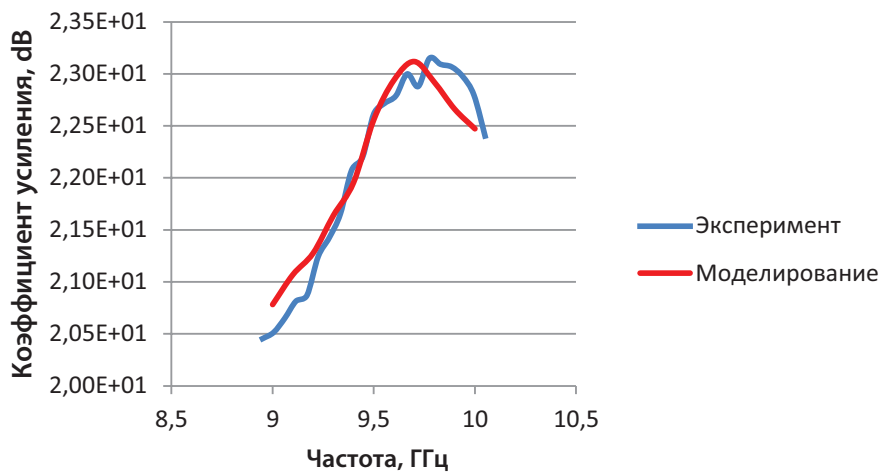


Рис. 13

Сравнение смоделированного и экспериментального коэффициента усиления при 10 дВт на входе

Заключение

В работе рассмотрена методика экстракции параметров модели СВЧ транзистора на основе AlGaIn/GaN, представленного его эквивалентной схемой. Предложена методика извлечения параметров внутренней схемы, процесс нахождения которой затруднён из-за температурных эффектов. Из анализа измеренных параметров транзистора показано, что эффект саморазогрева транзистора наблюдается и при режиме работы на малом сигнале. Произведено моделирование усилителя X-диапазона и проведено сравнение характеристик изготовленного прибора с его расчётными характеристиками. Совпадение характеристик свидетельствует о правильности восстановленной модели.

Литература

1. Официальный сайт изготовителя СВЧ МИС Triquint [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.triquint.com> (дата обращения: 15.09.2017).
2. GaN-on-silicon carbide design kit improves accuracy [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.electronicweekly.com/news/products/software/gan-silicon-carbide-designkit-improves-accuracy-2014-07/> (дата обращения: 05.10.2017).
3. Официальный сайт компании AlphaCHIP [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.alphachip.ru> (дата обращения: 10.09.2017).
4. Официальный сайт компании Тезис Интехна [Электронный ресурс]. – URL: <http://thesys-intechna.com> (дата обращения: 10.06.2017).
5. Аболдуев И. М., Вейц В. В., Евграфов А. Ю., Миннебаев В. М., Солтаханов С. У., Черных А. В. Исследование СВЧ параметров GaAs диода с барьером Шоттки для генератора шума в X-диапазоне частот // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2014. – № 3 (234). – С. 4-8.
6. Angelov I. Chalmers Nonlinear HEMT and MESFET Model Extraction Procedure, Part B, Chalmers University of Technology, Dept. of Microwave Technology, Report no. 26, November, 1996.
7. Экстракция параметров модели гетероструктурного полевого транзистора / Л. И. Аверина, Д. А. Бессонов, Р. А. Рыбалкин, Е. В. Аверина // Вестник ВГУ. Серия Физика. Математика. – 2012. – № 1. – С. 5-12.
8. A technique for extracting small-signal equivalent-circuit elements of HEMTs / Man-Young Jeon, Byung-Gyu Kim, Young-Jin Jeon, Yoon-Ha Jeong // IEICE Trans. Electron., Vol. E82-C, No. 11, November 1999. – pp. 1968-1976.
9. Zubkov A. M., Garber G. Z., Krasilnikov V. D. Computer-aided design system for microwave Schottky barrier field-effect transistors and microwave integrated circuits // *Materialy VI nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Tverdotelnaya elektronika, slozhnye funktsionalnye bloki REA»* [Proceedings of VI science and technical conference «Solid-state electronics, complex functional blocks of radio-electronic equipment»], Vladimir, 21-23 March 2007. Moscow, MNTORES Publ., 2007, pp. 43-44.

References

1. Triquint company official web-site. – URL: <http://www.triquint.com> (accessed 15 September 2017).
2. GaN-on-silicon carbide design kit improves accuracy. – URL: <http://www.electronicweekly.com/news/products/software/gan-silicon-carbide-designkit-improves-accuracy-2014-07/> (accessed 5 October 2017).
3. AlphaCHIP company official web-site. – URL: <http://www.alphachip.ru> (accessed 10 September 2017).
4. Tesis Intekhna company official web-site. – URL: <http://thesys-intechna.com> (accessed 10 June 2017).
5. Abolduev I. M., Veyz V. V., Evgrafov A. Y., Minnebaev V. M., Soltakhanov S. U., Chernykh A. V. Investigation of GaAs diodes with barrier Schottky for solid state noise source of X band. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory* [Electronic engineering. Ser. 2. Semiconductor devices], 2014, № 3 (234), pp. 4-8.
6. Angelov I. Chalmers Nonlinear HEMT and MESFET Model Extraction Procedure, Part B, Chalmers University of Technology, Dept. of Microwave Technology, Report no. 26, November, 1996.
7. Parameter extraction of heterostructure FET model / Averina L. I., Bessonov D. A., Rybalkin R. A., Avering E. V. [VGU Bulletin. Physics Series. Mathematics], 2012, № 1, pp. 5-12.
8. A technique for extracting small-signal equivalent-circuit elements of HEMTs / Man-Young Jeon, Byung-Gyu Kim, Young-Jin Jeon, Yoon-Ha Jeong // IEICE Trans. Electron., Vol. E82-C, No. 11, November 1999. – pp. 1968-1976.
9. Zubkov A. M., Garber G. Z., Krasilnikov V. D. Computer-aided design system for microwave Schottky barrier field-effect transistors and microwave integrated circuits // *Materialy VI nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Tverdotelnaya elektronika, slozhnye funktsionalnye bloki REA»* [Proceedings of VI science and technical conference «Solid-state electronics, complex functional blocks of radio-electronic equipment»], Vladimir, 21-23 March 2007. Moscow, MNTORES Publ., 2007, pp. 43-44.