

УДК 621.382

**И.М. Добуш, К.В. Дудинов, Д.Д. Зыков, А.С. Сальников,
А.А. Попов, А.М. Емельянов, Д.С. Брагин, Д.Р. Хайров**

Разработка масштабируемой малосигнальной модели 0,1 мкм GaAs-pHEMT-транзистора для усилительных применений

Описана разработка масштабируемой малосигнальной модели pHEMT-транзистора на основе GaAs с проектной нормой 0,1 мкм для применения в САПР электронных устройств. При её построении в качестве базового был выбран транзистор с общей шириной затвора 6×35 мкм, для которого достигнута хорошая точность в различных режимах работы по постоянному току и в широком диапазоне частот. Разработанная модель может использоваться для ускорения и удешевления разработки усилительных СВЧ-монокристаллических интегральных схем, в которых базовым активным элементом является pHEMT-транзистор. В дальнейших исследованиях полученная модель станет основой для создания более сложных типов моделей, таких как шумовые и нелинейные.

Ключевые слова: СВЧ-транзистор, модель СВЧ-транзистора, СВЧ-интегральная схема, экстракция параметров модели, эквивалентная схема, малосигнальная модель, линейные параметры, pHEMT, GaAs.

DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-4-37-47

Сверхвысокочастотные (СВЧ) интегральные схемы (ИС) являются неотъемлемыми компонентами при разработке современных и перспективных радиоэлектронных устройств и систем [1–5]. Они могут производиться в больших объемах, имеют низкую стоимость изготовления в массовом производстве, малые вес и размеры, хорошую воспроизводимость параметров, высокую надёжность [6–8]. Вместе с тем требования к качеству и скорости проектирования СВЧ ИС всё более ужесточаются.

Общей научно-технической задачей при создании любых интегральных СВЧ-устройств на всех этапах цикла разработки является создание библиотек стандартных элементов [9]. Проектирование современных СВЧ ИС невозможно без использования специализированных систем автоматизированного проектирования (САПР) электронных устройств. При этом важную роль в процессе проектирования играют библиотеки элементов, которые интегрируются в САПР и позволяют осуществить моделирование и разработку топологии ИС для конкретной технологии изготовления. Библиотека элементов позволяет наиболее просто передать сведения о технологии проектировщикам схем как внутри предприятия, так и сторонним организациям. Это позволит повысить эффективность разработки СВЧ-устройств. Этим определяется актуальность исследования.

Важнейшей составной частью библиотеки являются электрические модели отдельных элементов ИС, позволяющие предсказать создаваемые на их основе характеристики разрабатываемой схемы. Электрические модели различаются по сложности, зависящей от различных факторов (активные или пассивные компоненты, количество изменяемых параметров, моделируемые эффекты, особенности технологии и др.) [10–15].

Данная работа посвящена разработке масштабируемой малосигнальной модели pHEMT-транзи-

сторов, изготовленных на основе GaAs с проектной нормой 0,1 мкм. pHEMT-транзистор является базовым активным элементом для разработки усилительных СВЧ ИС, а его линейная модель является основой для создания более сложных типов моделей, таких как шумовые и нелинейные.

Описание масштабируемой малосигнальной модели транзистора

Для восстановления линейных параметров из измеренных данных матрицы транзисторов использовалась малосигнальная эквивалентная схема (ЭС), состоящая из 18 элементов (рис. 1). ЭС, а также методики экстракции её параметров и выбора репрезентативных транзисторов подробно описаны в работах [16, 17].

К внешним элементам малосигнальной ЭС относятся ёмкости, ассоциируемые с электродами транзистора C_{pg} , C_{pd} , C_{pgd} , сопротивления металлизации и контактных областей R_g , R_s , R_d и индуктивности металлизации L_g , L_s , L_d .

Внутренние параметры ЭС восстановлены во всех рабочих точках базового транзистора. Для возможности выбора рабочей точки в малосигнальной модели реализован блок считывания файла, в котором записаны значения внутренних элементов ЭС, а также значения токов стока и затвора для базового транзистора в каждой рабочей точке.

Среди внутренних элементов ЭС присутствуют дифференциальные проводимости диодов затвора R_{gdf} , R_{gsf} , благодаря которым ЭС может воспроизводить S-параметры транзистора в режимах, где ток затвора оказывает существенное влияние на характеристики прибора.

Для возможности масштабирования малосигнальной модели относительно единичной ширины затвора UGW и количества затворов NFG в подсхеме реализованы следующие выражения:

$$SFN = \frac{NFG}{NFG_{ref}}, \quad (1)$$

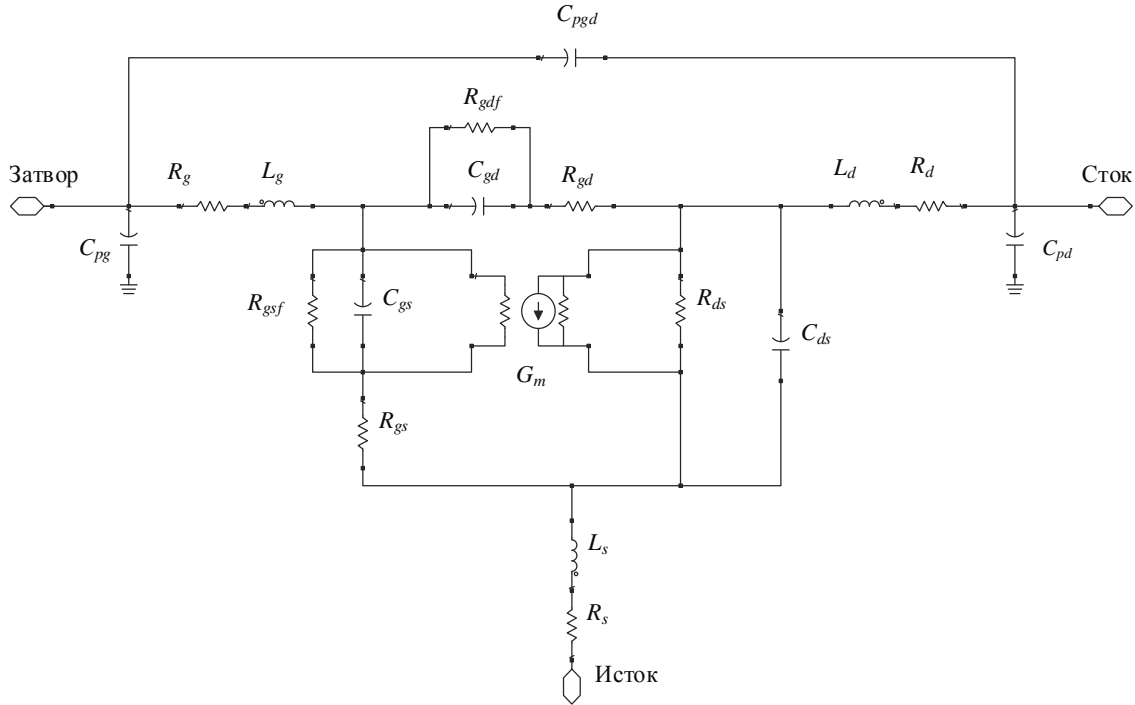


Рис. 1. Малосигнальная эквивалентная схема транзистора

$$SFGW = \frac{UGW}{UGW_{ref}}, \tag{2}$$

$$SF = SFN \cdot SFGW, \tag{3}$$

$$SFG = \frac{SFN}{SFGW}, \tag{4}$$

где UGW – единичная ширина затвора текущей малосигнальной модели; NFG – число затворов текущей малосигнальной модели; UGW_{ref} – единичная ширина затвора базового транзистора; NFG_{ref} – число затворов базового транзистора.

Выражения (1)–(4) используются в виде коэффициентов пропорциональности для значений элементов ЭС базового транзистора при изменении параметров UGW и NFG масштабируемой малосигнальной модели.

Сопротивление затвора R_g масштабируется по правилу

$$R_g = \frac{R_{g_ref}}{SFG}, \tag{5}$$

где R_g – сопротивление затвора в текущей малосигнальной модели с единичной шириной затвора UGW и числом затворов NFG ; R_{g_ref} – сопротивление затвора в малосигнальной модели базового транзистора.

Сопротивления $R_s, R_d, R_{gs}, R_{gd}, R_{gsf}, R_{gdf}$ масштабируются по правилу

$$R = \frac{R_{ref}}{SF}, \tag{6}$$

где R – значение сопротивления в текущей малосигнальной модели с единичной шириной затвора UGW и числом затворов NFG ; R_{ref} – значение сопротивления в малосигнальной модели базового транзистора.

Внешние ёмкости C_{pg}, C_{pd}, C_{pgd} масштабируются по правилу

$$C = C_{ref} \cdot SFN, \tag{7}$$

где C – значение ёмкости в текущей малосигнальной модели с единичной шириной затвора UGW и числом затворов NFG ; C_{ref} – значение ёмкости в малосигнальной модели базового транзистора.

Индуктивности L_g и L_d масштабируются по правилу

$$L = L_{ref} \cdot SFGW, \tag{8}$$

где L – значение индуктивности в текущей малосигнальной модели с единичной шириной затвора UGW и числом затворов NFG ; L_{ref} – значение индуктивности в малосигнальной модели базового транзистора.

Индуктивность L_s , внутренние ёмкости C_{gs}, C_{gd}, C_{ds} и крутизна транзистора G_m масштабируются по правилу

$$X = X_{ref} \cdot SF, \tag{9}$$

где X – значение элемента в текущей малосигнальной модели с единичной шириной затвора UGW и числом затворов NFG ; X_{ref} – значение элемента в малосигнальной модели базового транзистора.

Экстракция параметров малосигнальной модели базового транзистора и её верификация

При построении масштабируемой малосигнальной модели в качестве базового был выбран транзистор с общей шириной затвора 6×35 мкм. Результаты восстановления некоторых внутренних параметров малосигнальной ЭС базового транзистора во множестве рабочих точек представлены на рис. 2.

На рис. 3 представлены результаты измерений семейства выходных вольт-амперных характеристик (ВАХ) базового транзистора с отмеченными точками, в которых проводилась верификация малосигнальной модели.

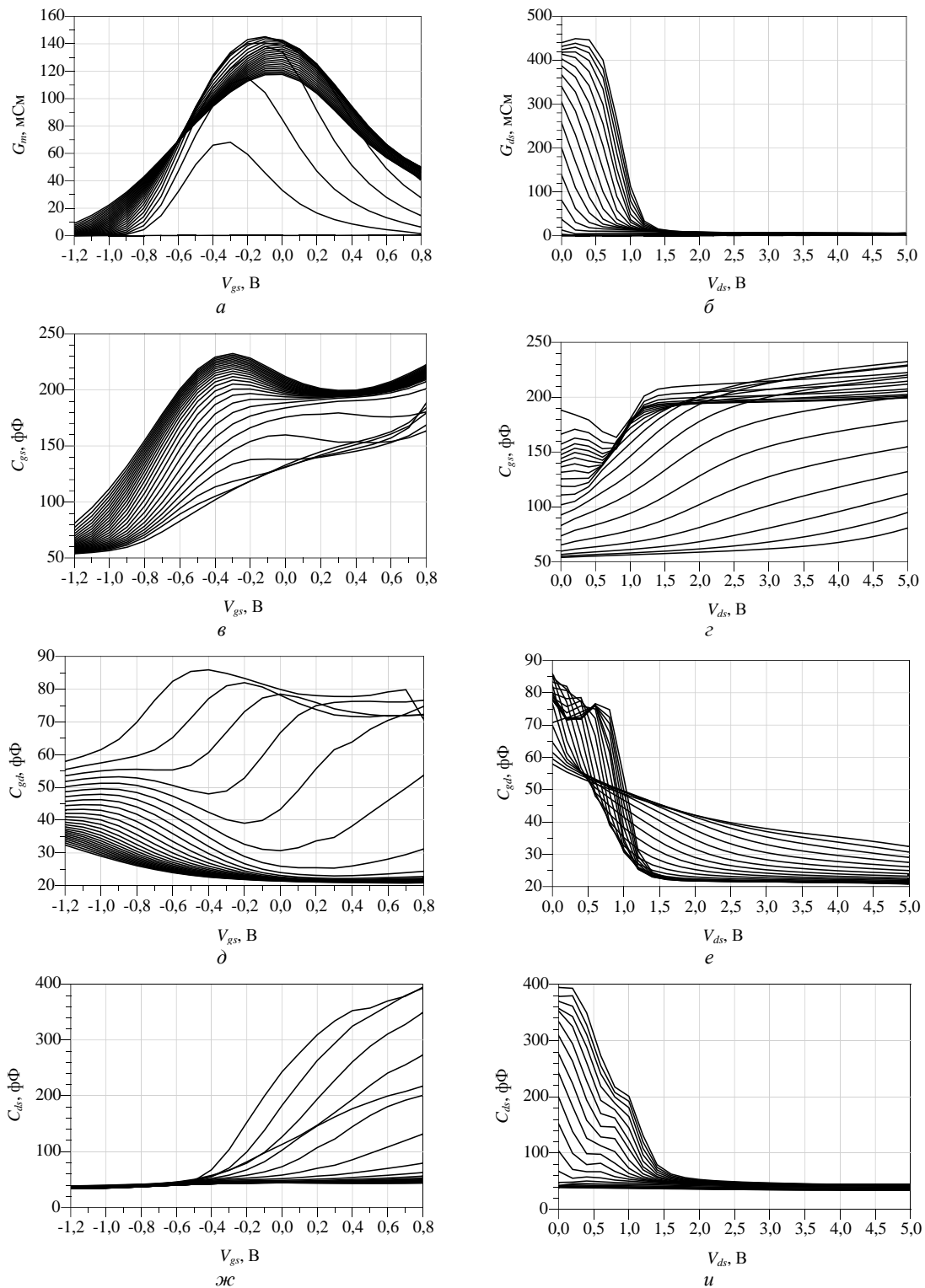


Рис. 2. Внутренние параметры ЭС транзистора с общей шириной затвора 6×35 мкм во множестве рабочих точек: крутизна (а); выходная проводимость (б); ёмкость затвор-исток (в, г); ёмкость затвор-сток (д, е); ёмкость сток-исток (ж, и)

Сравнение измеренных и рассчитанных S -параметров в данных точках в диапазоне частот от 0,1 до 67 ГГц приведено на рис. 4.

Верификация малосигнальной модели транзистора по критерию масштабирования относительно периферии затвора

Для верификации малосигнальной модели транзистора по критерию масштабирования относи-

тельно единичной ширины затвора были выбраны результаты измерений S -параметров транзисторов с периферией затвора 6×25 и 6×50 мкм. Сравнение измеренных и рассчитанных S -параметров для данных транзисторов представлено на рис. 5–6.

Для верификации малосигнальной модели по критерию масштабирования относительно числа затворов были выбраны результаты измерений

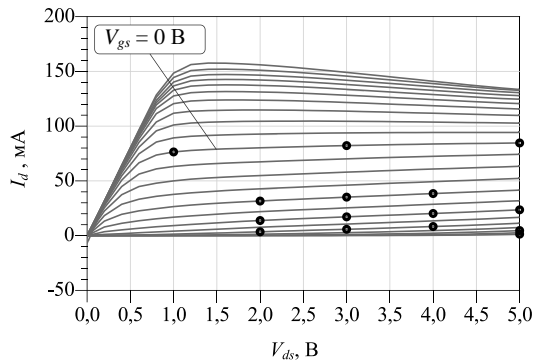


Рис. 3. Результаты измерений семейства выходных ВАХ базового транзистора с отмеченными точками для проведения верификации малосигнальной модели

S -параметров транзисторов с периферией затвора 2×35 , 4×35 и 8×35 мкм. Сравнение измеренных и рассчитанных S -параметров для данных транзисторов представлено на рис. 7–9.

Заключение

Разработана масштабируемая малосигнальная модель рНЕМТ-транзисторов, изготовленных на основе GaAs с проектной нормой 0,1 мкм для применения в САПР электронных устройств. При её построении в качестве базового был выбран транзистор с общей шириной затвора 6×35 мкм, для которого достигнута хорошая точность в различных режимах работы по постоянному току и в широком диапазоне частот.

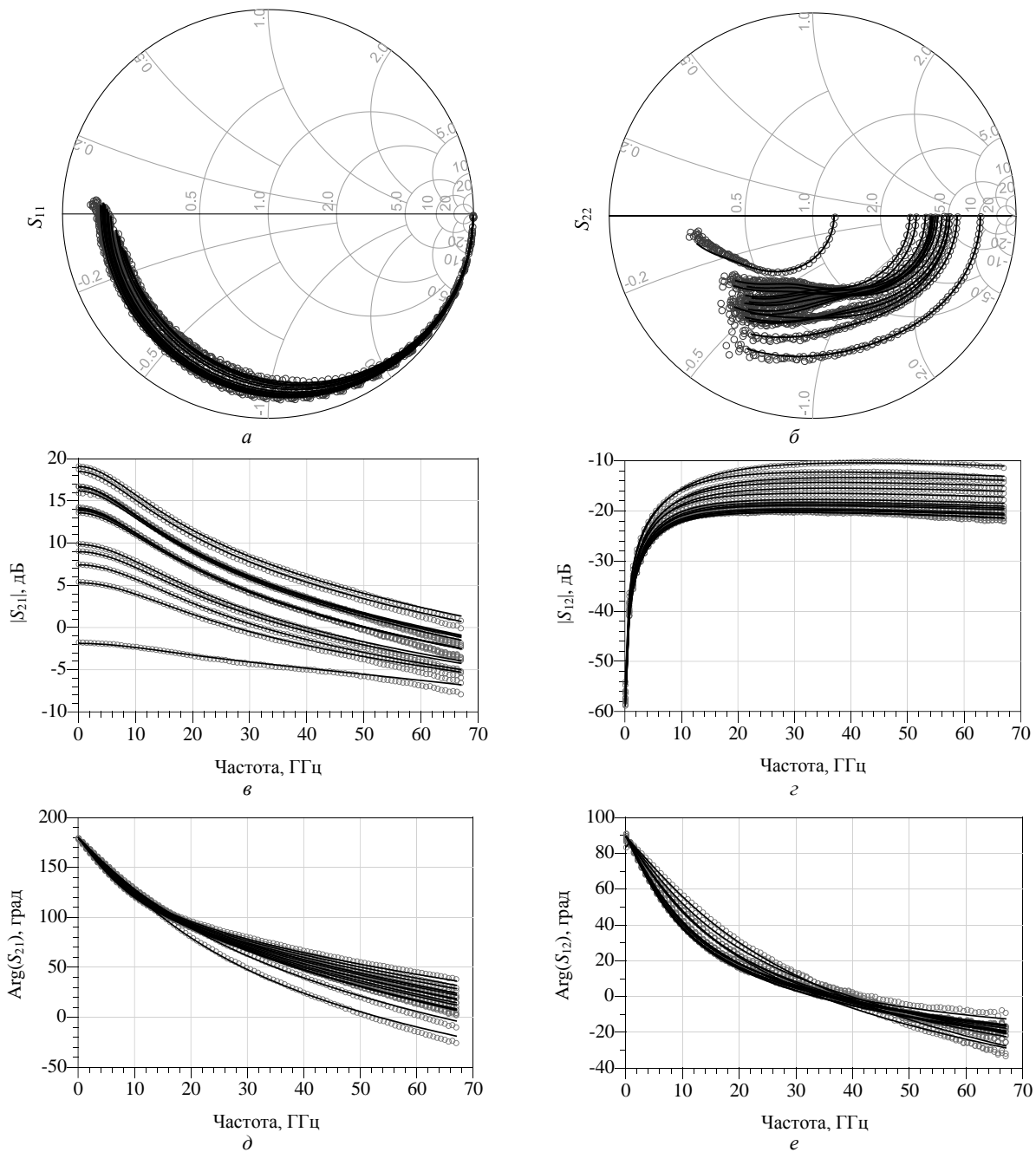


Рис. 4. Сравнение измеренных (точечные линии) и рассчитанных (сплошные линии) S -параметров базового транзистора в диапазоне частот от 0,1 до 67 ГГц

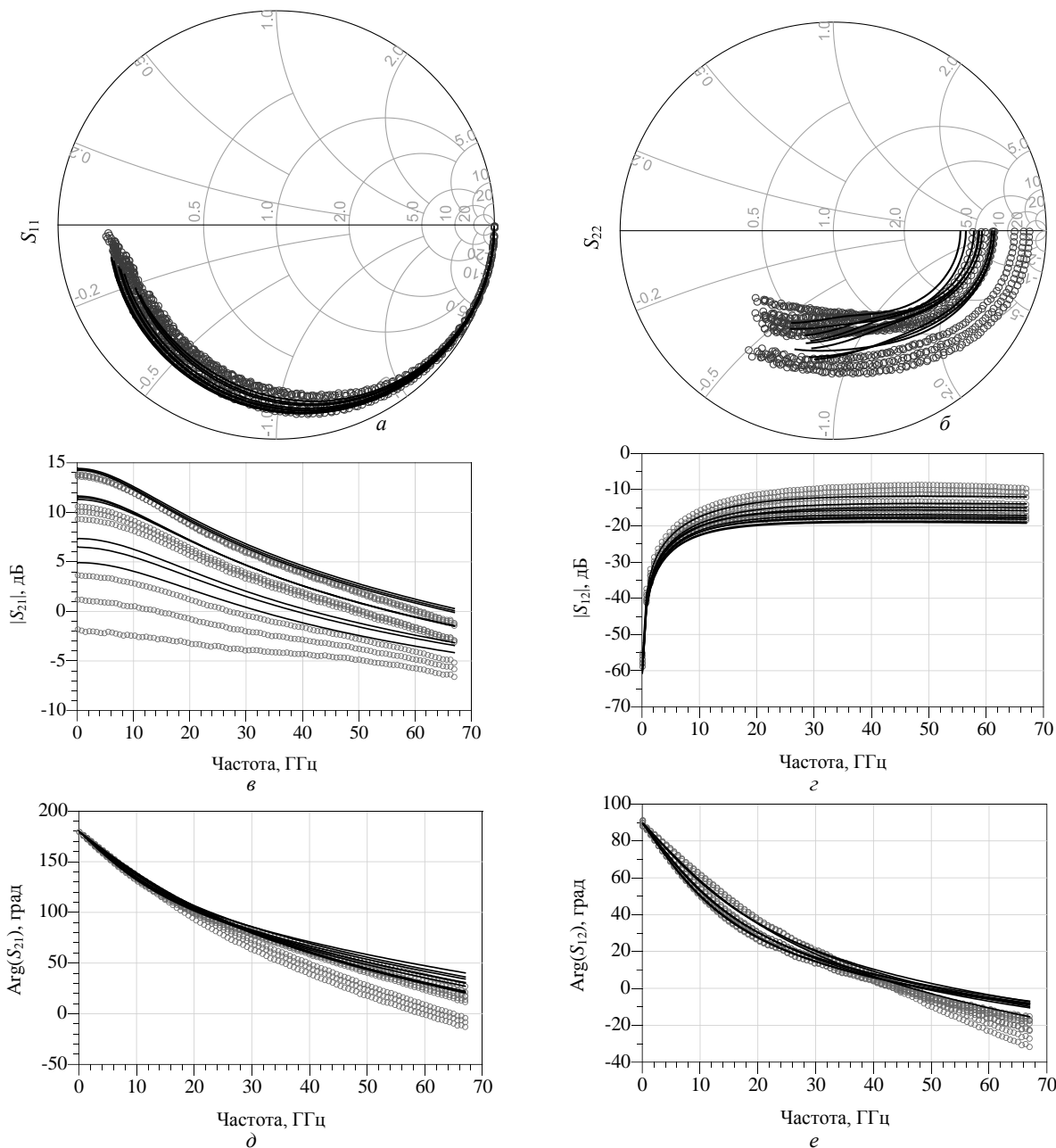


Рис. 5. Сравнение измеренных (точечные линии) и рассчитанных (сплошные линии) S -параметров транзистора с периферией затвора 6×25 мкм в диапазоне частот от 0,1 до 67 ГГц при напряжениях $V_{ds} = (2; 3; 4)$ В и $V_{gs} = (-0,8; -0,6; -0,4)$ В

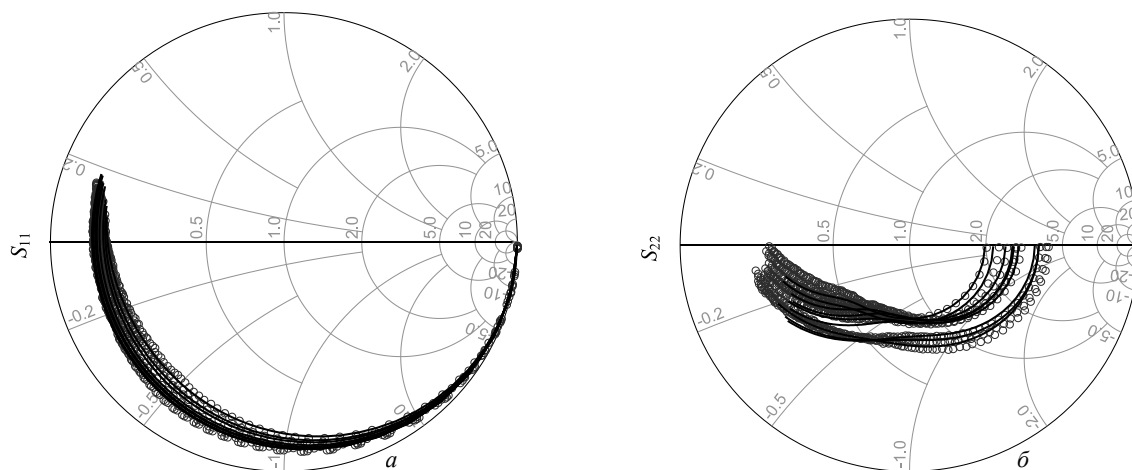


Рис. 6 (начало)

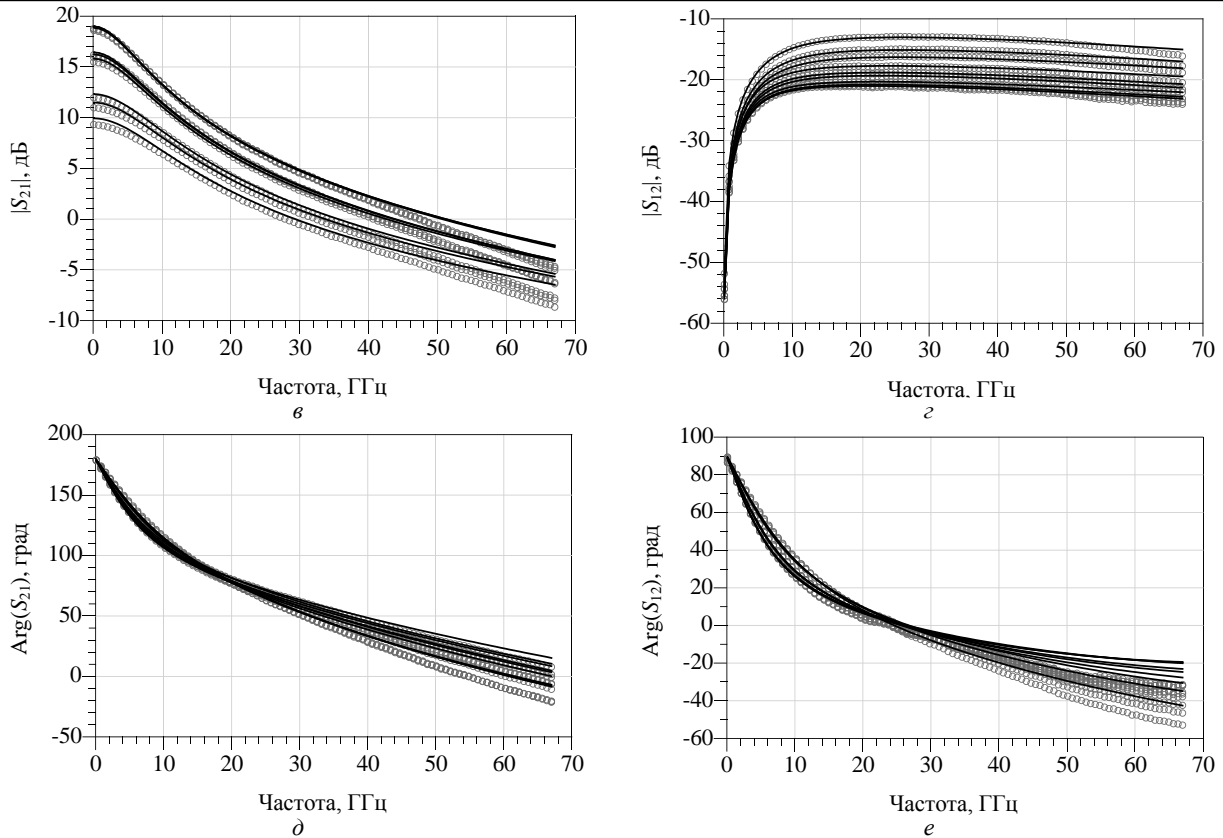


Рис. 6 (окончание). Сравнение измеренных (точечные линии) и рассчитанных (сплошные линии) S -параметров транзистора с периферией затвора 6×50 мкм в диапазоне частот от 0,1 до 67 ГГц при напряжениях $V_{ds} = (2; 3; 4)$ В и $V_{gs} = (-0,8; -0,6; -0,4)$ В

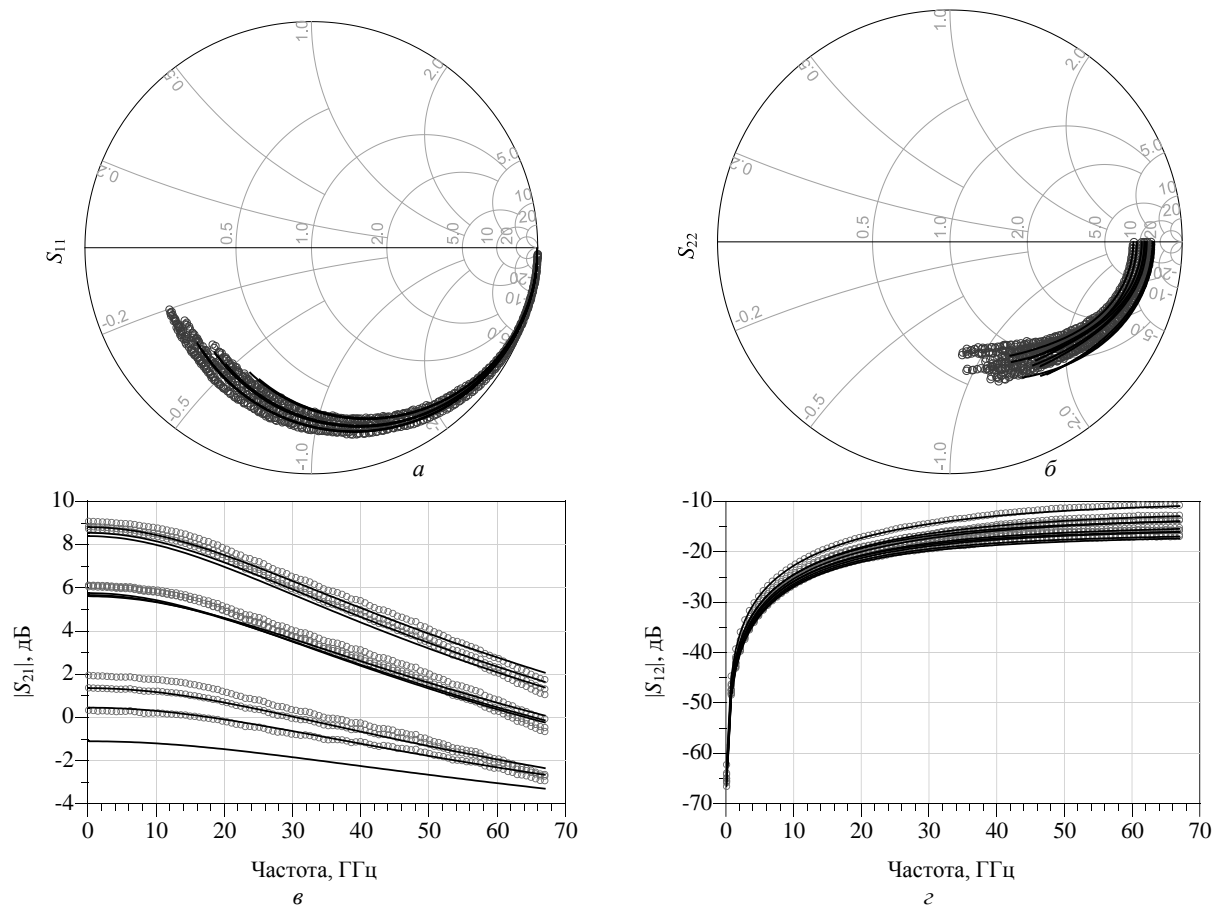


Рис. 7 (начало)

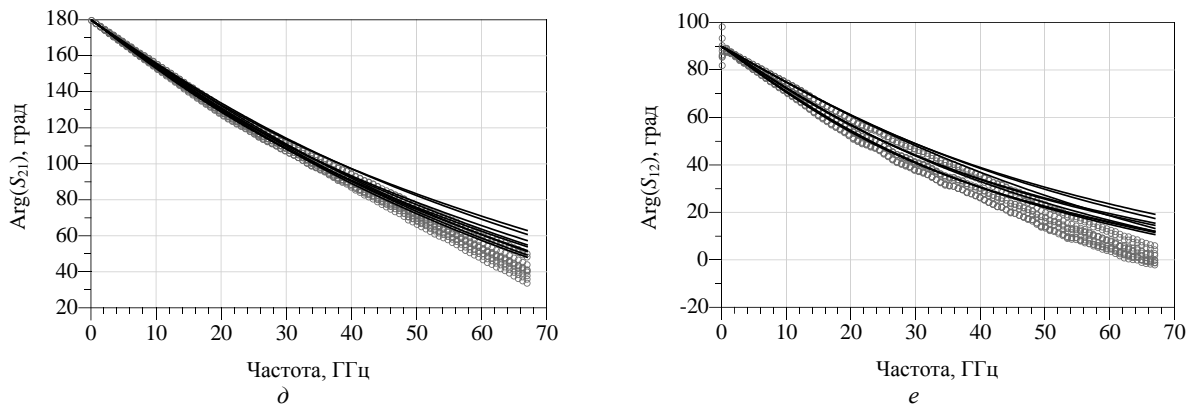


Рис. 7 (окончание). Сравнение измеренных (точечные линии) и рассчитанных (сплошные линии) S -параметров транзистора с периферией затвора 2×35 мкм в диапазоне частот от 0,1 до 67 ГГц при напряжениях $V_{ds} = (2; 3; 4)$ В и $V_{gs} = (-0,8; -0,6; -0,4)$ В

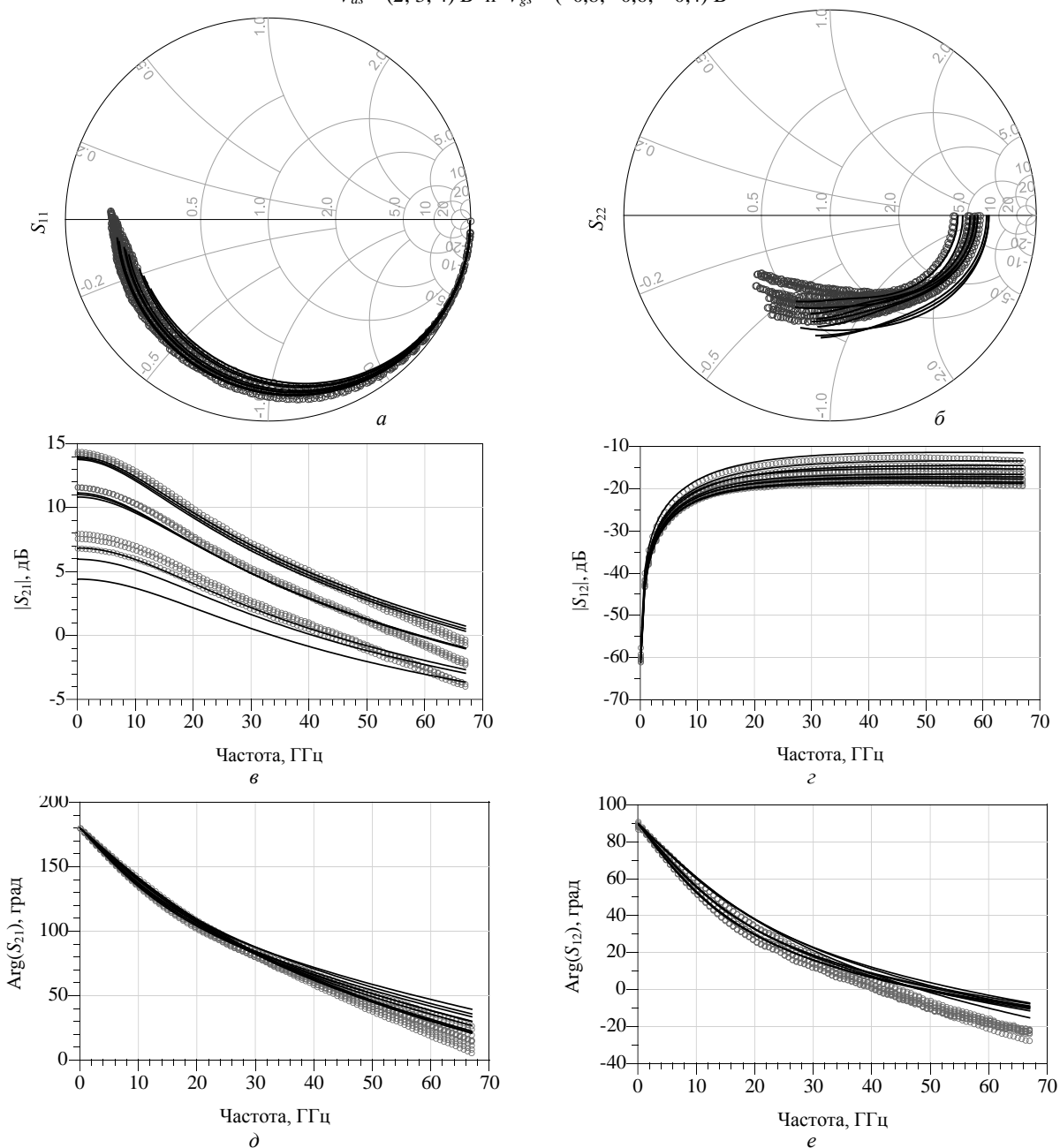


Рис. 8. Сравнение измеренных (точечные линии) и рассчитанных (сплошные линии) S -параметров транзистора с периферией затвора 4×35 мкм в диапазоне частот от 0,1 до 67 ГГц при напряжениях $V_{ds} = (2; 3; 4)$ В и $V_{gs} = (-0,8; -0,6; -0,4)$ В

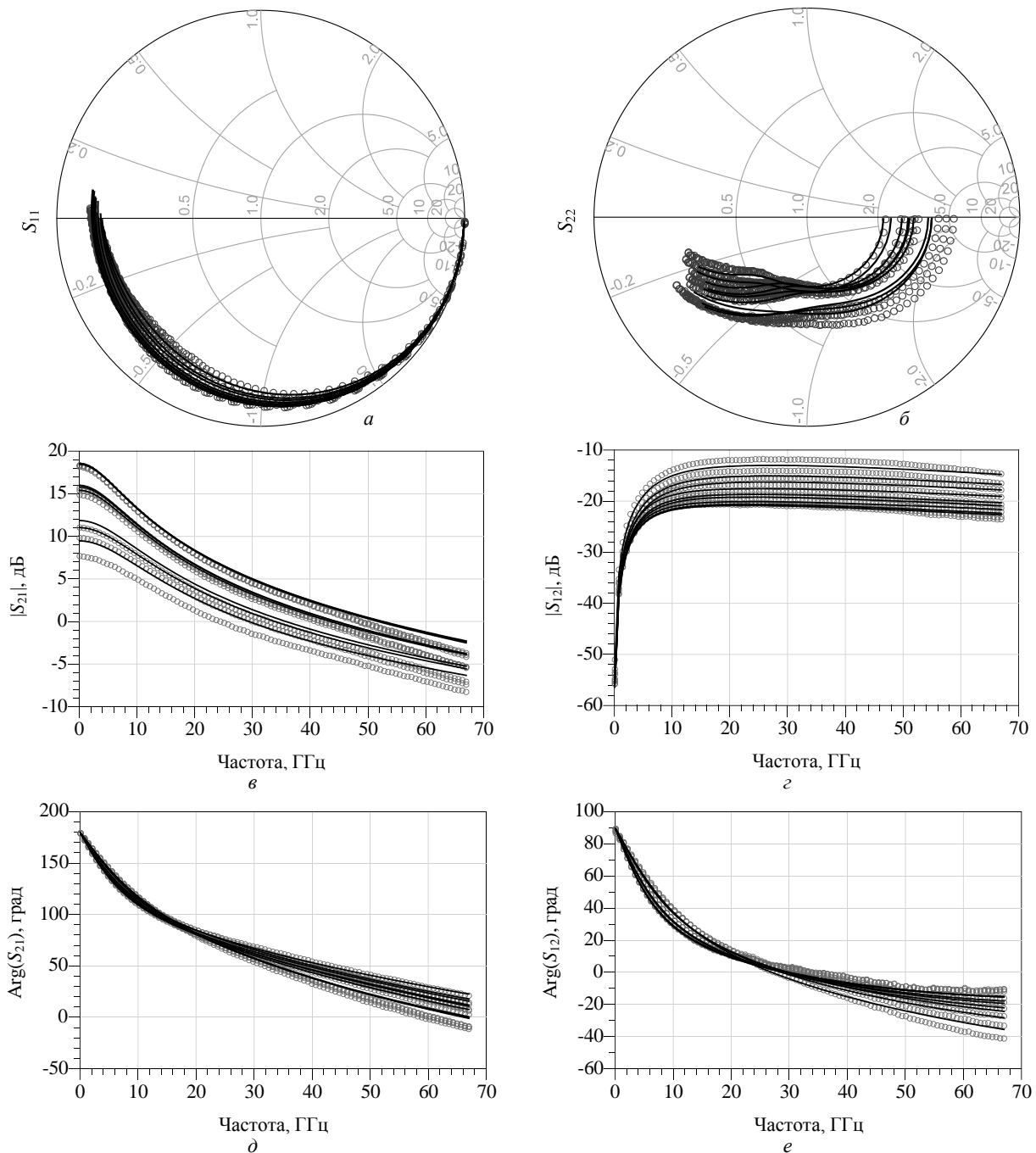


Рис. 9. Сравнение измеренных (точечные линии) и рассчитанных (сплошные линии) S -параметров транзистора с периферией затвора 8×35 мкм в диапазоне частот от 0,1 до 67 ГГц при напряжениях $V_{ds} = (2; 3; 4)$ В и $V_{gs} = (-0,8; -0,6; -0,4)$ В

Снижение точности масштабируемой линейной модели наблюдается при переходе к меньшим перифериям затвора, это может быть вызвано несколькими факторами: технологический разброс измеренных образцов транзисторов, неопределенности при проведении процедуры дээмбеддинга, использование традиционных аппроксимирующих функций.

Дальнейшие исследования в рамках настоящей тематики целесообразно вести в следующих направлениях: повышение точности масштабирования на меньших перифериях затвора; валидация модели в усилительных устройствах; использование результатов для построения более сложных типов моделей, таких как шумовые и нелинейные.

Работа подготовлена в рамках реализации программы ЛИЦ «Доверенные сенсорные системы» (Договор № 009/20 от 10.04.2020) при финансовой поддержке Минкомсвязи России и АО «РВК». Идентификатор соглашения о предоставлении субсидии – 0000000007119P190002.

Литература

1. Sensing and Communication Integrated System for Autonomous Driving Vehicles / Q. Zhang, H. Sun, Zh. Wei, Zh. Feng // IEEE INFOCOM 2020 – IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs), Toronto, ON, 6–9 July 2020. – IEEE, 2020. – P. 1278–1279.

2. Survey on 6G Frontiers: Trends, Applications, Requirements, Technologies and Future Research / C. De Alwis, A. Kalla, Q.-V. Pham, P. Kumar, K. Dev, W.-J. Hwang, M. Liyanage // IEEE Open Journal of the Communications Society. – 2021. – Vol. 2. – P. 836–886.

3. Terahertz band communication systems: Challenges, novelties and standardization efforts / K. Tekbıyık, A.R. Ekti, G.K. Kurt, A. Görçin // Physical Communication. – 2019. – Vol. 35. – P. 100700.

4. Abdel Hakeem S.A. Security Requirements and Challenges of 6G Technologies and Applications / S.A. Abdel Hakeem, H.H. Hussein, H. Kim // Sensors. – 2022. – Vol. 22, No. 5. – P. 1969.

5. Implementation Challenges and Opportunities in Beyond-5G and 6G Communication / U. Gustavsson, P. Frenger, C. Fager, T. Eriksson, H. Zirath, F. Dielacher, ... N. Carvalho // IEEE Journal of Microwaves. – 2021. – Vol. 1, No. 1. – P. 86–100.

6. Marsh S. Practical MMIC Design. – Artech House, 2006. – P. 376.

7. Golio M. RF and Microwave Passive and Active Technologies / M. Golio, J. Golio. – Boca Raton: CRC Press, 2007. – P. 736.

8. Robertson I.D. RFIC and MMIC Design and Technology / I.D. Robertson, S. Lucyszyn. – London, UK: The Institution of Electrical Engineers, 2001. – 555 p. – P. 125–181. DOI: 10.1049/PBCS013E

9. Development of a 0.15 μm GaAs pHEMT Process Design Kit for Low-Noise Applications / I.M. Dobush, I.S. Vasil'evskii, D.D. Zыkov, D.S. Bragin, A.S. Salnikov, A.A. Popov, A.A. Gorelov, N.I. Kargin // Electronics (Basel). – 2021. – Vol. 10, No. 22. – P. 2775.

10. A new extrinsic equivalent circuit of HEMT's including noise for millimeter-wave circuit design / G. Dambine, J.-M. Belquin, F. Danneville, A. Cappy // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1998. – Vol. 46, No. 9 – P. 1231–1236.

11. Berroth M. Broad-band determination of the FET small-signal equivalent circuit / M. Berroth, R. Bosch // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – IEEE, 1990. – Vol. 38, No. 7 – P. 891–895.

12. Luo L. Small-signal modeling and parameter extraction method for a multigate GaAs pHEMT switch / L. Luo, J. Liu, G. Wang, Y. Wu // Journal of Semiconductors. – 2020. – Vol. 41, No. 3. – P. 032102.

13. Caddemi A. Equivalent-circuit-based modeling of the scattering and noise parameters for multi-finger GaAs pHEMTs / A. Caddemi, E. Cardillo, G. Crupi // International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields. – 2019. – January. – P. e2587.

14. Angelov I. Extensions of the Chalmers nonlinear HEMT and MESFET model / I. Angelov, L. Bengtsson, M. Garcia // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1996. – Vol. 44, No. 10. – P. 1664–1674.

15. ASM-HEMT: Compact model for GaN HEMTs / A. Dasgupta, S. Ghosh, Y.S. Chauhan, S. Khandelwal // 2015 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC). – IEEE. – 2015. – No. 4. – P. 495–498.

16. A combined technique for amplifier oriented small-signal noise model extraction / A.A. Popov, D.V. Bilevich, A.S. Salnikov, I.M. Dobush, A.E. Goryainov, A.A. Kalentyev, A.A. Metel // International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering. – 2020. – Vol. 30, No. 9. – P. e22273.

17. Automatic golden device selection and measurement smoothing algorithms for microwave transistor small-signal noise modeling / A.S. Salnikov, I.M. Dobush, A.A. Popov, D.V. Bilevich, A.E. Goryainov, A.A. Kalentyev, A.A. Metel //

International Journal of Microwave and Wireless Technologies. – 2022. – P. 1–12.

Добуш Игорь Мирославович

Канд. техн. наук, инженер ООО «50ohm Тех.», с.н.с. лаб. «50ohm Lab», каф. КСУП ТУСУРа Красноармейская ул., 147, г. Томск, Россия, 634045
Тел.: +7-923-402-92-86
Эл. почта: igor.dobush@50ohm.tech

Дудинов Константин Владимирович

Зам. нач. научно-производственного комплекса АО «НПП Исток им. Шокина»
Вокзальная ул., 2а, г. Фрязино, Московская обл., Россия, 141190
Тел.: +7 (495-4) 65-86-93
Эл. почта: kvdudinov@istokmw.ru

Зыков Дмитрий Дмитриевич

Канд. техн. наук, доцент, технический директор ООО «Центр проектирования и технологий полупроводниковых изделий», зав. базовой каф. микроэлектроники, информационных технологий и управляющих систем (МИТУС) ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-15-29
Эл. почта: Dmitry.Zykov@tusur.ru

Сальников Андрей Сергеевич

Канд. техн. наук, вед. н.с. ООО «50ohm Тех.», зав. лаб. «50ohm Lab», каф. КСУП ТУСУРа Красноармейская ул., 147, г. Томск, Россия, 634045
Тел.: +7-913-886-44-65
Эл. почта: andrei.salnikov@50ohm.tech

Попов Артем Александрович

Науч. сотр. ООО «50ohm Тех.», каф. КСУП ТУСУРа, м.н.с. лаб. «50ohm Lab»
Красноармейская ул., 147, г. Томск, Россия, 634045
Тел.: +7-913-880-78-12
Эл. почта: artem.popov@50ohm.tech

Емельянов Артем Михайлович

Вед. инженер-технолог АО «НПП Исток им. Шокина»
Вокзальная ул., 2а, г. Фрязино, Московская обл., Россия, 141190
Тел.: +7 (495-4) 65-86-93
Эл. почта: amemeljanov@istokmw.ru

Брагин Дмитрий Сергеевич

Директор Проектного офиса ЦК НТИ «Технологии доверенного взаимодействия» ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7-952-151-65-48
Эл. почта: bds@csp.tusur.ru

Хайров Дамир Рашидович

Директор по развитию ООО «Центр проектирования и технологий полупроводниковых изделий»
Кулакова ул., 20/1, г. Москва, Россия, 123592
Тел.: +7-960-372-76-73
Эл. почта: d.hairov@i-pdk.ru

Dobush I.M., Dudinov K.V., Zykov D.D., Sal'nikov A.S., Popov A.A., Emelyanov A.M., Bragin D.S., Khayrov D.R.
Development of a scalable small-signal 0.1 μ m GaAs-pHEMT-model for amplifier applications

This work deals with the development of a 0.1- μ m GaAs-pHEMT-model for use in EDA applications. The model is constructed using a reference transistor with a total gate width of $6 \times 35 \mu\text{m}$, which showed good accuracy under different DC operation modes in a wide frequency range. The developed model can be used to speed up and reduce the cost of the monolithic microwave integrated circuit amplifiers design in which the pHEMT transistor is the basic active element. In further studies the obtained model will be extended to develop more complex types of models, such as noise and nonlinear ones.

Keywords: microwave transistor, microwave transistor model, monolithic microwave integrated circuit, extraction of model parameters, equivalent circuit, small-signal model, linear parameters, pHEMT, GaAs.

DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-4-37-47

References

- Zhang Q., Sun H., Wei Zh., Feng Zh. Sensing and communication integrated system for autonomous driving vehicles. *Proceedings of IEEE INFOCOM 2020 – IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, Toronto, ON, Canada, 6–9 July 2020, pp. 1278–1279.
- De Alwis C., Kalla A., Pham Q.-V., Kumar P., Dev K., Hwang W.-J., Liyanage M. Survey on 6G frontiers: trends, applications, requirements, technologies and future research. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, 2, pp. 836–886.
- Tekbıyık K., Ekti A.R., Kurt G.K., Görçin A. Terahertz band communication systems: challenges, novelties and standardization efforts. *Physics Communications*, 2019, 35, p. 100700.
- Abdel Hakeem S.A., Hussein H.H., Kim H. Security requirements and challenges of 6G technologies and applications. *Sensors*, 2022, 22, p. 1969.
- Gustavsson U., Frenger P., Fager C., Eriksson T., Zirath H., Dielacher F., ... Carvalho N. Implementation challenges and opportunities in beyond-5G and 6G communication. *IEEE Journal of Microwaves*, 2021, 1, pp. 86–100.
- Marsh S. *Practical MMIC Design*; Artech House, Inc.: Norwood, MA, 2006. 376 p.
- Golio M., Golio J. *RF and Microwave Passive and Active Technologies*. Boca Raton, CRC Press, 2007. 736 p.
- Robertson I.D., Lucyszyn S. *RFIC and MMIC Design and Technology*. London, UK, The Institution of Electrical Engineers, 2001, 555 p. pp. 125–181. DOI: 10.1049/PBCS013E.
- Dobush, I.M.; Vasil'evskii, I.S.; Zykov, D.D.; Bragin, D.S.; Salnikov, A.S.; Popov, A.A.; ... Kargin, N.I. Development of a 0.15 μm GaAs-pHEMT-process design kit for low-noise applications. *Electronics* (Basel) 2021, 10, p. 2775.
- Dambrine G., Belquin J.-M., Danneville F., Cappy A. A new extrinsic equivalent circuit of HEMT's including noise for millimeter-wave circuit design. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*, 1998, 46, pp. 1231–1236.
- Bertho M., Bosch R. Broad-band determination of the FET small-signal equivalent circuit. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*, 1990, 38, pp. 891–895.
- Luo L., Liu J., Wang G., Wu Y. Small-signal modeling and parameter extraction method for a multigate GaAs-pHEMT switch. *Journal of Semiconductors*, 2020, 41, p. 032102.
- Caddemi A., Cardillo E., Crupi G. Equivalent-circuit-based modeling of the scattering and noise parameters

for mul-ti-finger GaAs-pHEMTs. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Field*, 2020, 33, e2587.

14. Angelov I., Bengtsson L., Garcia M. Extensions of the Chalmers nonlinear HEMT and MESFET model. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1996, 44, pp. 1664–1674.

15. Dasgupta A., Ghosh S., Chauhan Y.S., Khandelwal S. ASM-HEMT: Compact model for GaN HEMTs, *Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC)*, Singapore, 1–4 June 2015, pp. 495–498.

16. Popov A.A., Bilevich D.V., Salnikov A.S., Dobush I.M., Goryainov A.E.; Kalentyev A.A.; Metel A.A. A combined technique for amplifier oriented small-signal noise model extraction. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 2020, vol. 30, no. 9, pp. e22273.

17. Salnikov A.S., Dobush I.M., Popov A.A., Bilevich D.V., Goryainov A.E., Kalentyev A.A., Metel A.A. Automatic golden device selection and measurement smoothing algorithms for microwave transistor small-signal noise modelin. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2022, pp. 1–12.

Igor M. Dobush

Candidate of Science in Engineering, Engineer, 50ohm Technologies LLC, Senior Researcher, Department of Computer Control Systems and Design, Research Laboratory «50ohm Lab», Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 147, Krasnoarmeiskaya str., Tomsk, Russia, 634045
 ORCID: 0000-0002-3626-1419
 Phone: +7-923-402-92-86
 Email: igor.dobush@50ohm.tech

Konstantin V. Dudinov

Candidate of Science in Engineering, Deputy-Head of Scientific-Production Complex, Research and Production Corporation Istok JSC 2A, Vokzalnaya str., Fryazino, Moscow Region, Russia, 141190
 Phone: +7 (495-4) 65-86-93
 Email: kvdudinov@istokmw.ru

Dmitry D. Zykov

Candidate of Science in Engineering, Associate Professor, Technical Director, Semiconductor Design and Technology Center LLC, Head of Chair «Microelectronics, Informational Technologies and Control Systems», TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
 ORCID: 0000-0002-9587-4629
 Phone: +7 (382-2) 70-15-29
 Email: Dmitry.Zykov@tusur.ru

Andrei S. Salnikov

Candidate of Science in Engineering, Lead Researcher, 50ohm Technologies LLC, Head of Research Laboratory «50ohm Lab», Department of Computer Control Systems and Design, TUSUR 147, Krasnoarmeiskaya str., Tomsk, Russia, 634045
 ORCID: 0000-0002-5827-9556
 Phone: +7-913-886-44-65
 Email: andrei.salnikov@50ohm.tech

Artem A. Popov

Researcher, 50ohm Technologies LLC, Researcher,
Department of Computer Control Systems and Design,
Research Laboratory «50ohm Lab», TUSUR
147, Krasnoarmeiskaya str., Tomsk, Russia, 634045
ORCID: 0000-0001-6010-4459
Phone: +7-913-880-78-12
Email: artem.popov@50ohm.tech

Artem M. Emelyanov

Leading Process Engineer, Research and Production
Corporation Istok JSC
2A, Vokzalnaya str., Fryazino, Moscow Region,
Russia, 141190
Phone: +7 (495-4) 65-86-93
Email: amemeljanov@istokmw.ru

Dmitry S. Bragin

Director of the Project Office of the Central Committee
of the NTI «Technologies of Trusted Interaction» TUSUR
40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0002-0875-3301
Phone: +7-952-151-65-48
Email: bds@csp.tusur.ru

Damir R. Khayrov

Director of Development, Semiconductor Design
and Technology Center LLC
Kulakov str., 20/1, Moscow, Russia, 123592
Phone: +7-960-372-76-73
Email: d.hairov@i-pdk.ru