

УДК 621.3.049.77

DOI: 10.36845/2073-8250-2020-257-2-37-46

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ПАРАМЕТРЫ КОМПАКТНЫХ МОДЕЛЕЙ КОМПОНЕНТОВ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

А.А. Попов, Д.В. Билевич, А.С. Сальников, А.А. Калентьев

*Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР)
634050, г. Томск, пр-кт Ленина, д. 40*

В работе представлены результаты исследования влияния параметров технологических материалов на значения элементов эквивалентных схем пассивных и активных компонентов СВЧ монолитных интегральных схем. Получены зависимости элементов эквивалентной схемы МДМ конденсатора и катушки индуктивности, установлено, что наибольшее влияние на параметры ЭС моделей пассивных компонентов имеет толщина подложки. Представлены результаты исследования влияния длины затвора и глубины подзатворного рецесса на параметры малосигнальной модели полевого транзистора с затвором Шоттки. Для исследованных зависимостей получены одномерные модели, описывающие полученные зависимости.

Ключевые слова: электромагнитное моделирование, приборно-технологическое моделирование, виртуальная метрология, СВЧ монолитные интегральные схемы

Сведения об авторах:

*Попов Артем Александрович, ORCID: 0000-0001-6010-4459, artem.a.popov@tusur.ru;
Билевич Дмитрий Вячеславович, ORCID: 0000-0001-7421-7403, dmitrii.v.bilevich@tusur.ru;
Сальников Андрей Сергеевич, к.т.н., ORCID: 0000-0002-5827-9556, andrei.salnikov@main.tusur.ru;
Калентьев Алексей Анатольевич, к.т.н., ORCID: 0000-0001-7829-5345, aleksei.a.kalentyev@tusur.ru*

STUDY ON THE INFLUENCE OF ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS ON THE PARAMETERS OF COMPACT MODELS OF THE COMPONENTS USED IN RADIO FREQUENCY MONOLITHIC INTEGRATED CIRCUITS

A.A. Popov, D.V. Bilevich, A.S. Salnikov, A.A. Kalentyev

*Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR)
Russia, 634050, Tomsk, Lenina prosp., 40*

In this paper we demonstrate the results of the study on how the geometric parameters effect the model parameters of passive and active components. As we found out, the substrate thickness has the greatest influence on the equivalent circuit model parameters of passive components. Paper demonstrates the influence of the gate length and the gate recess depth on the parameters of small-signal model of the MESFET. The obtained dependences are presented for the MIM capacitor model, inductor model and GaAs MESFET model.

Keywords: semiconductor device simulation, virtual metrology, microwave monolithic integrated circuit

Data of authors: *Artem Aleksandrovich Popov, artem.a.popov@tusur.ru; Dmitry Vyacheslavovich Bilevich, dmitrii.v.bilevich@tusur.ru; Andrey Sergeevich Salnikov, Ph.D., andrei.salnikov@main.tusur.ru; Aleksey Anatolyevich Kalentyev, Ph.D., aleksei.a.kalentyev@tusur.ru*

Введение

Современный подход к изготовлению полупроводниковых монокристаллических интегральных микросхем (МИС) позволяет изготавливать в едином технологическом процессе большое количество микросхем одного типа. Однако практически невозможно обеспечить протекание операционных технологических процессов равномерно по всей пластине [1, 2]. При изготовлении интегральных схем присутствуют отклонения параметров технологического процесса, таких как плотность ионного пучка, температура разгонки примеси, абберация оптической системы и т. п. Описанные флуктуации приводят к тому, что геометрические размеры и параметры материалов получаемых структур варьируются в некотором диапазоне, что в свою очередь влияет на характеристики компонентов СВЧ МИС. Это влияние можно обнаружить и в значениях параметров компактных моделей, которые строятся на основе характеристик компонентов. Это даёт возможность получить выражения, связывающие параметры технологии и моделей элементов, изготовленных по этой технологии с помощью выражений, с меньшей вычислительной сложностью в сравнении с физико-технологическим моделированием.

Данный подход имеет сходные черты с подходом виртуальной метрологии – предсказание результата технологических операций по данным, получаемым с датчиков оборудования [3]. Однако в данной работе исследуется зависимость параметров элементов эквивалентных схем (ЭС), имеющих физический смысл, от параметров материалов и геометрии элементов СВЧ МИС. Данные зависимости анализировались для МДМ конденсатора, катушки

индуктивности и полевого транзистора с барьером Шоттки (ПТШ). Для ПТШ исследовалось влияние длины затвора на параметры модели; из литературы известно, что уменьшение длины затвора повышает предельные частоты прибора [4], однако повышение это ограничивается короткоканальными эффектами [5, 6]. Также известно, что для кремниевых МОП транзисторов технологические или электрофизические параметры могут быть включены в компактную SPICE-модель [7, 8].

В настоящей работе исследовались зависимости элементов эквивалентной схемы компонентов СВЧ МИС от параметров материалов и геометрии. В качестве варьируемых параметров, которые определяются технологией и влияют на параметры моделей, выбраны следующие: толщина подложки, диэлектрическая проницаемость подложки, толщина металлизации, ширина проводящих линий, ширина и положение затвора транзистора. Рассмотрены МДМ конденсатор, спиральная катушка индуктивности, ПТШ на GaAs подложке. Для получения характеристик элементов использовалось электромагнитное и физико-технологическое моделирование. Для описания полученных зависимостей использовались одномерные модели.

Пассивные компоненты СВЧ МИС

Расчёт характеристик пассивных компонентов СВЧ МИС (МДМ конденсатора и катушки индуктивности) при варьировании параметров материалов и геометрии проводился с использованием электромагнитного моделирования. При моделировании в качестве типовых параметров GaAs подложки были заданы толщина 100 мкм, диэлектрическая проницаемость подложки – 12,9, тангенс угла диэлектрических

потерь – 0,001. В качестве диэлектрика для МДМ конденсатора был задан слой Si_3N_4 с диэлектрической проницаемостью 5,9 и толщиной 0,15 мкм. Верхняя обкладка конденсатора имела квадратную форму со стороной 40 мкм. Толщина металлизации верхней обкладки конденсатора и спирали катушки индуктивности была выбрана 2 мкм, толщина нижней обкладки и контактной линии спирали – 1 мкм.

При исследовании влияния геометрических параметров на параметры модели конденсатора варьировались толщина подложки, диэлектрическая проницаемость подложки и высота верхней обкладки конденсатора. Построение модели конденсатора проводилось по методике, описанной в [9]. Эквивалентная схема конденсатора представлена на рис. 1.

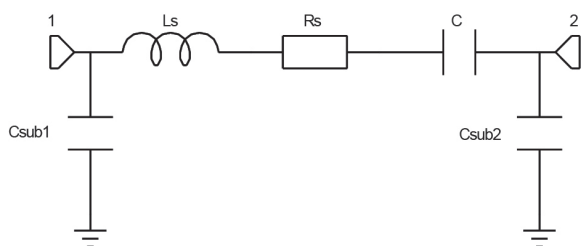


Рис. 1

Эквивалентная схема модели конденсатора

Номинальные значения параметров получены при толщине подложки 100 мкм. В исследованном диапазоне значения параметров отклоняются от номинального значения L_s – не более 20 %, C_{sub1} – не более 5 % и C_{sub2} – не более 20 %. Из этого заключаем, что толщина подложки слабо влияет на данные параметры. На рис. 2 показаны значения элементов ЭС C_{sub1} и C_{sub2} , а также для сравнения расчётная ёмкость отрезка МПЛ, имеющего размеры, совпадающие с размерами обкладки конденсатора [10]. Полученные характеристики имеют

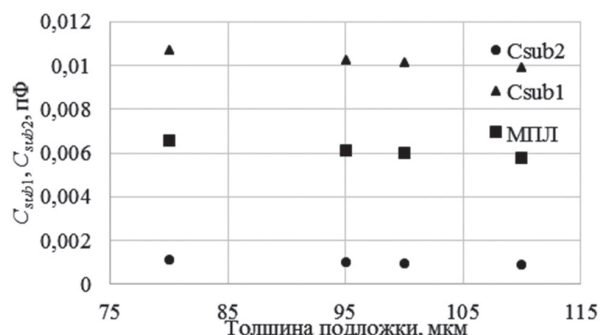


Рис. 2

Зависимость значений элементов ЭС модели конденсатора от толщины подложки

схожий характер зависимости, а значения имеют один порядок.

Качественно полученная теоретическая зависимость совпадает с зависимостью значений элементов от толщины подложки. Однако помимо эффектов, возникающих в МПЛ, наблюдаются посторонние эффекты, влияющие на значение элементов ЭС модели конденсатора, из-за чего наблюдается различие в значении ёмкости для МПЛ и для модели конденсатора.

Также исследования показали, что изменение толщины металлизации верхней обкладки слабо влияет на параметры модели конденсатора. Параметры полученных моделей представлены в табл. 1.

Из данных, приведённых в табл. 1, видно, что даже при увеличении толщины металлизации в 2,5 раза значения элементов остаются неизменными, кроме сопротивления R_s . Таким образом, можно заключить, что толщина металлизации слабо влияет на характеристики МДМ конденсатора. Слабая зависимость сопротивления от толщины объясняется, по-видимому, скин-эффектом, из-за которого эффективное сечение проводника приблизительно одинаково при толщинах больших скин-слоя. Например, на частоте 1 ГГц для золота толщина скин-слоя равна 2,4 мкм.

Таблица 1

Значения элементов ЭС модели конденсатора

Толщина металлизации верхней обкладки, мкм	2	3	4	5
L_s , нГ	0,053	0,052	0,052	0,051
R_s , Ом	0,202	0,129	0,125	0,124
C , пФ	0,53	0,53	0,53	0,53
C_{sub1} , пФ	0,01	0,01	0,01	0,01
C_{sub2} , пФ	0,001	0,0011	0,0011	0,0012

На следующем этапе проводилось исследование спиральной катушки индуктивности с шириной спирали 10 мкм, числом витков 2,5 и расстоянием между витками 10 мкм. Эквивалентная схема катушки представлена на рис. 3, для построения модели использовалась методика, описанная в [9].

В случае с катушкой индуктивности исследовалась взаимосвязь между параметрами модели и такими параметрами, как толщина подложки, диэлектрическая проницаемость подложки, толщина металлизации и ширина спирали. В ходе исследования было обнаружено, что каждый из геометрических параметров влияет на определённую группу параметров модели.

Стоит отметить, что толщина подложки имеет взаимосвязь со всеми параметрами модели. Наибольшая зависимость от толщины подложки наблюдается на элементах R_{sub1} и R_{sub2} (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что влияние толщины подложки на параметры модели катушки имеет линейный вид. Полученные уравнения, описывающие данные зависимости, имеют следующий вид:

$$R_{sub1} = 0,079h - 3,7;$$

$$R_{sub2} = 0,17h - 12,07,$$

где h – толщина подложки, мкм.

Коэффициент детерминации составил 0,95 и 0,97 для R_{sub1} и R_{sub2} соответственно. При изменении толщины подложки на $\pm 20\%$ наблюдается изменение значения па-

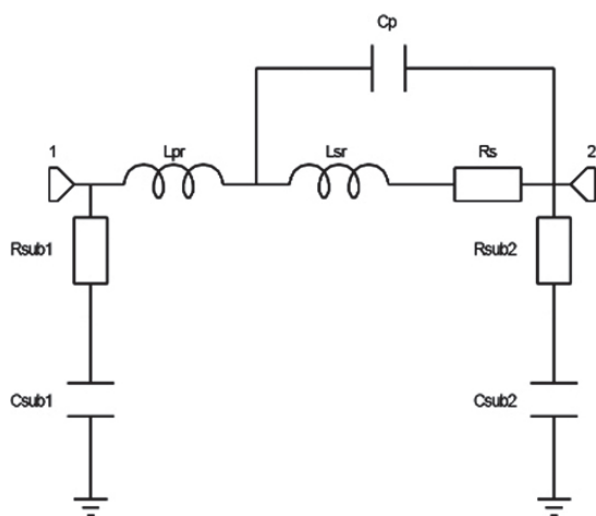


Рис. 3

Эквивалентная схема модели спиральной катушки индуктивности

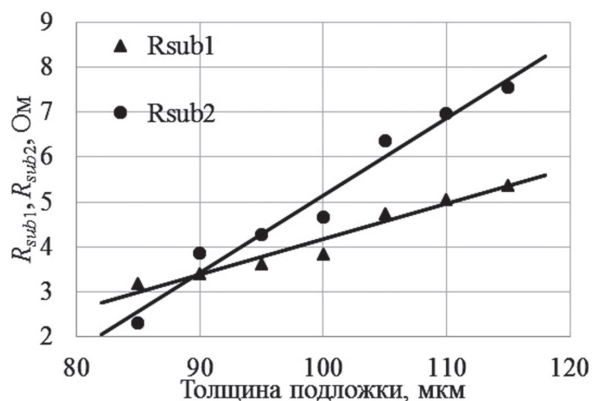


Рис. 4

Зависимость значений элементов ЭС модели катушки от толщины подложки

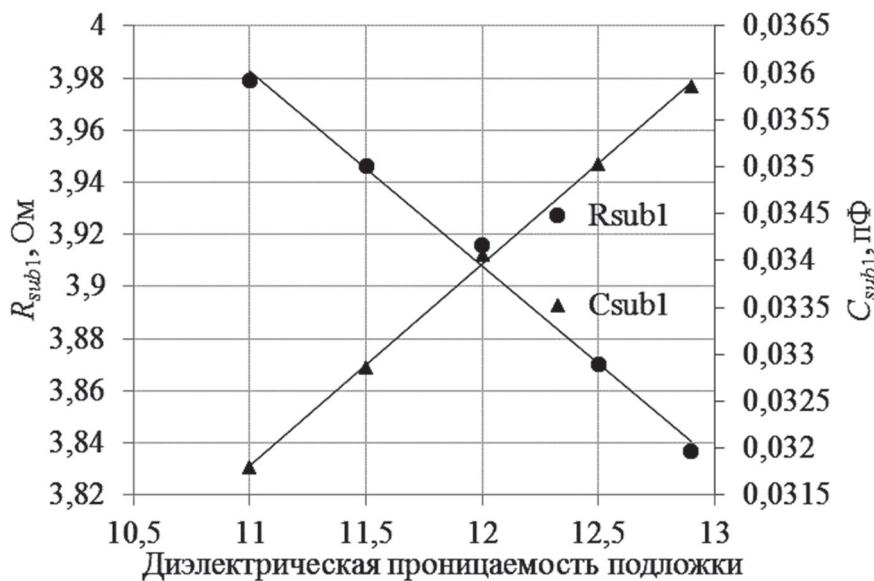


Рис. 5

Зависимость значений элементов ЭС модели катушки от диэлектрической проницаемости подложки

параметра R_{sub2} модели в 2 раза от номинального значения и в 1,5 раза для параметра R_{sub1} , полученных при толщине подложки 100 мкм.

Влияние значения диэлектрической проницаемости наблюдается только для элементов R_{sub1} , R_{sub2} , C_{sub1} и C_{sub2} . Значительное влияние наблюдается для параметров R_{sub1} и C_{sub1} (рис. 5).

Полученные зависимости имеют линейный вид, уравнения, описывающие дан-

ную зависимость, имеют следующий вид:

$$C_{sub1}(\text{пФ}) = 0,002\varepsilon + 0,008;$$

$$R_{sub1} = -0,075\varepsilon + 4,8,$$

где ε – диэлектрическая проницаемость подложки.

Коэффициент детерминации равен 0,99 в обоих случаях. Результаты численного эксперимента по изменению толщины металлизации и ширины спирали представлены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Значения элементов ЭС модели катушки в зависимости от толщины металлизации

Толщина металлизации, мкм	2	3	4	5	6
L_{pr} , нГ	0,34	0,38	0,40	0,41	0,42
L_{sr} , нГ	0,77	0,70	0,66	0,63	0,61
R_s , Ом	1,87	1,58	1,46	1,42	1,38
C_p , фФ	0,41	0,34	0,14	0,14	0,26
C_{sub1} , фФ	35,86	36,86	37,97	38,32	38,56
C_{sub2} , фФ	31,04	32,19	33,32	36,03	36,37
R_{sub1} , Ом	3,84	3,96	4	3,92	3,95
R_{sub2} , Ом	4,662	4,57	4,57	2,67	2,63

Таблица 3

Значения элементов ЭС модели катушки
в зависимости от ширины спирали

Ширина спирали, мкм	2	3	4
L_{pr} , нГ	0,34	0,34	0,34
L_{sr} , нГ	0,77	0,75	0,73
R_s , Ом	1,87	1,79	1,74
C_p , фФ	0,41	1,56	2,83
C_{sub1} , фФ	36	37	37
C_{sub2} , фФ	31	31	33
R_{sub1} , Ом	3,84	3,7	3,64
R_{sub2} , Ом	4,66	4,77	3,78

Анализируя полученные зависимости, можно заметить, что взаимосвязь между геометрическими параметрами и параметрами модели для катушки индуктивности имеет более выраженный характер, чем для МДМ конденсатора.

GaAs полевой транзистор с барьером Шоттки

Также исследовалась взаимосвязь геометрических параметров GaAs ПТШ и параметров эквивалентной схемы малосигнальной модели транзистора. Для получения параметров транзистора с разными значениями геометрических характеристик использовалось приборно-технологическое моделирование. Данный подход позволяет за короткое время получить большую выборку, при этом параметры будут хорошо контролируемы в широких пределах номинальных значений.

Моделируемый технологический процесс ПТШ включал следующие этапы: ионную имплантацию примеси в подложку для создания первоначальной примеси в подложке, имплантацию примеси для создания канала n -типа, осаждение затвора, осаждение ионов кремния для создания высоколегированных n^+ -контактных обла-

стей стока и истока и осаждение контактов стока и истока. В качестве первоначальной примеси в подложке использовались ионы бериллия. Канал n -типа был создан на глубине 0,3 мкм при помощи имплантации ионов кремния в структуру. Для обеспечения коэффициента усиления полученного транзистора на уровне 17 дБ на частоте 2 ГГц общая ширина затвора была задана 600 мкм, длина затвора 1 мкм. Полученная структура ПТШ представлена на рис. 6.

Для описания полученной структуры транзистора использовалась упрощённая эквивалентная схема малосигнальной модели, представленная в [11]. Упрощение

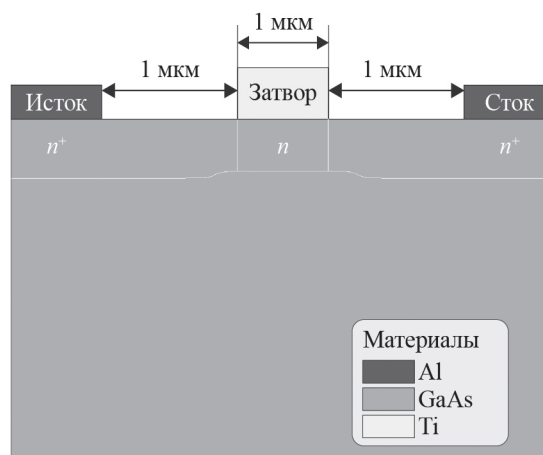


Рис. 6
Структура моделируемого ПТШ

состоит в том, что из описанной схемы были удалены внешние элементы. Удалённые из схемы элементы описывают паразитное влияние контактных площадок и подводящих линий, которые отсутствуют в численном эксперименте. Для получения S -параметров проводилось моделирование в режиме малого сигнала в диапазоне частот от 0,01 до 12 ГГц в рабочей точке $U_{си} = 3$ В, $U_{зи} = -0,2$ В. Верхняя частота для численного эксперимента определяется граничной частотой моделируемого прибора. Упрощённая эквивалентная схема малосигнальной модели транзистора представлена на рис. 7.

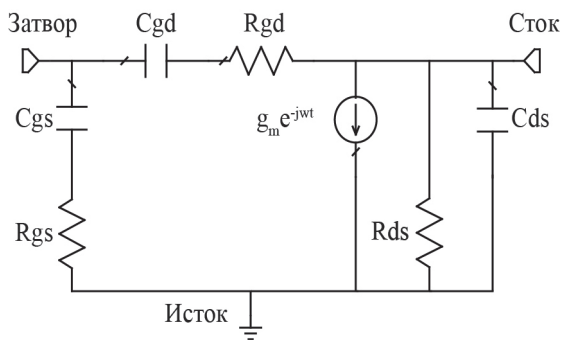
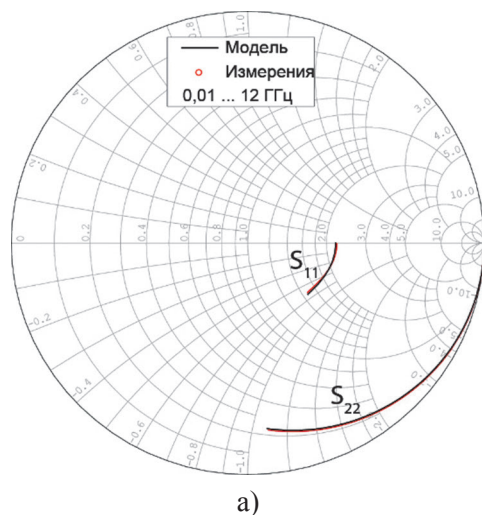


Рис. 7

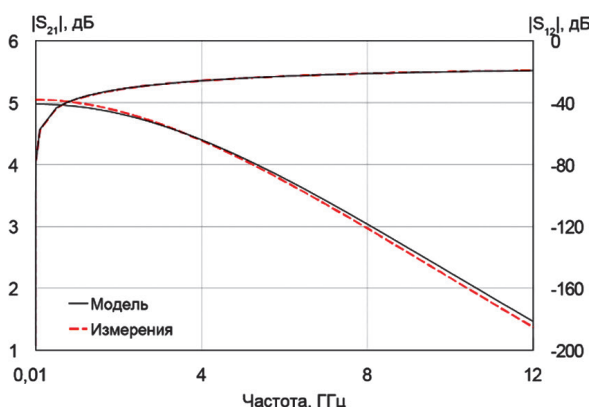
Эквивалентная схема полевого транзистора с затвором Шоттки в условиях малого сигнала

Экстракция модели проводилась по методике, описанной в [12]. Полученная модель для начальной структуры практически идеально описывает технологическую модель. Сравнение результатов приборно-технологического моделирования (измерения) и моделирования ЭС (модель) представлено на рис. 8. Общая ошибка моделирования S -параметров не превысила 1 %, что позволяет сделать вывод о применимости используемой ЭС для описания характеристик, полученных при помощи приборно-технологического моделирования.

На первом этапе проводилось исследование влияния длины затвора на параметры модели транзистора. Диапазон изменения значения длины затвора был задан от 0,15 до 3 мкм, при этом расстояние между контактами затвор-сток и затвор-исток оставалось неизменным и было равно 1 мкм. Анализ малосигнальных моделей показал, что зависимости обоих параметров C_{gd} и C_{gs} имеют квадратичный вид. На рис. 9 показаны полученные зависимости параметров модели от длины затвора.



а)



б)

Рис. 8

Результат моделирования S -параметров

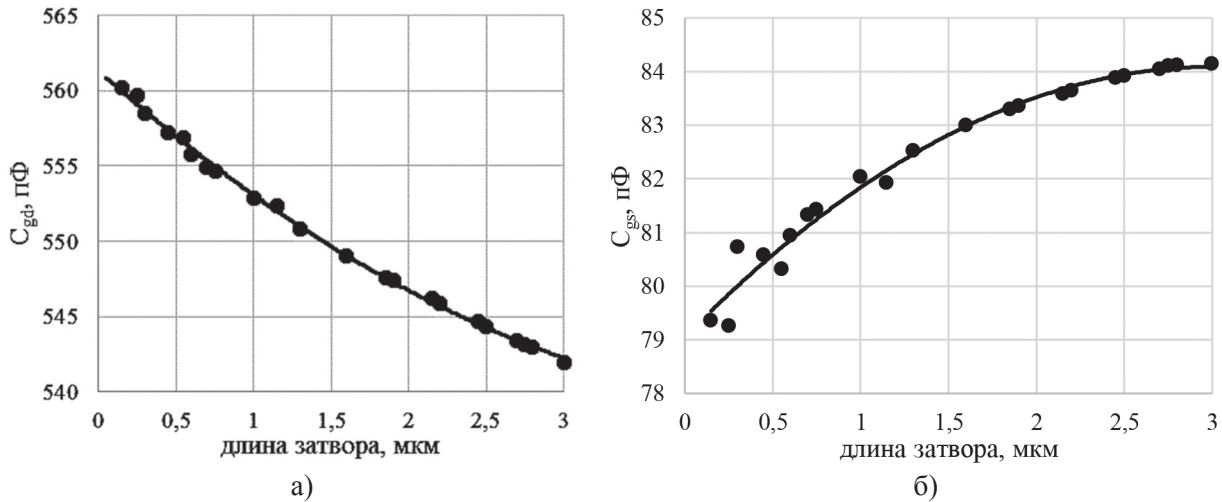


Рис. 9

Зависимость значения элементов C_{gd} (а) и C_{gs} (б) от длины затвора транзистора

Полученные уравнения, описывающие данные зависимости, имеют следующий вид:

$$C_{gd}(\text{пФ}) = 0,94L^2 - 9,15L + 561,3;$$

$$C_{gs}(\text{пФ}) = -0,56L^2 + 3,35L + 79,$$

где L – длина затвора, мкм.

Коэффициент детерминации равен 0,99 и 0,98 для C_{gd} и C_{gs} соответственно. Как можно заметить на рис. 9б, при низких значениях длины затвора наблюдается сильный разброс значения. При дальнейшем уменьшении длины затвора начнут действовать короткоканальные эффекты, для учёта которых необходимо будет усложнять приборно-технологическую модель, что может привести к изменению характера зависимости ёмкостей от длины затвора при малых значениях данной величины. Поэтому минимальное значение длины затвора в эксперименте составило 0,15 мкм.

На втором этапе проводилось исследование влияния глубины подзатворного рецесса на параметры модели транзистора. В рамках данного эксперимента значение глубины рецесса изменялось от 0 до 0,25 мкм с шагом 0,05 мкм. Результаты показали, что глубина рецесса влияет в большей степени на значение элемента

C_{gs} , которое изменяется от 84 до 531 пФ. При этом зависимость имеет нелинейный характер, как показано на рис. 10.

Данный характер зависимости приближен к экспоненциальной, уравнение, описывающее данную зависимость, имеет следующий вид:

$$C_{gs}(\text{пФ}) = 452,7e^{-7,9d},$$

где d – глубина подзатворного рецесса, мкм.

Коэффициент детерминации равен 0,89. Влияния геометрических параметров транзистора на остальные элементы схемы обнаружено не было.

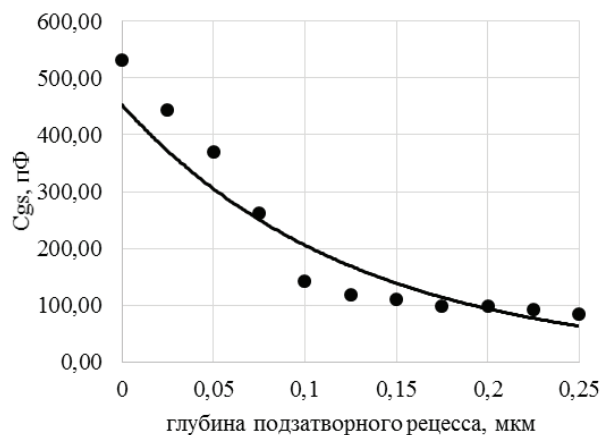


Рис. 10

Зависимость значения элемента C_{gs} от глубины подзатворного рецесса

Полученные результаты свидетельствуют о том, что исследуемые геометрические параметры влияют исключительно на значения ёмкостных параметров модели. Для каждой из найденных зависимостей были выведены уравнения, описывающие характер данных зависимостей.

Выводы

В ходе проведённых исследований было обнаружено, что зависимость между геометрическими параметрами пассивных компонентов и элементов ЭС моделей пассивных элементов выражена только в случае со спиральной катушкой индуктивности. Наибольшее влияние имеет толщина подложки, при изменении значения толщины подложки на 20 % значение сопротивлений R_{sub1} и R_{sub2} изменяется от 3,18 до 5,37 Ом и от 2,3 до 7,56 Ом соответственно. В ходе исследований были построены одномерные модели, описывающие взаимосвязь между геометрическими параметрами и соответствующими параметрами модели. Данные модели представлены в виде уравнений и в дальнейшем будут использоваться для построения многомерной модели, позволяющей описывать значения параметров модели в зависимости от полученной геометрии.

Эксперименты, проводимые при помощи приборно-технологического моделирования, показали, что существует зависимость между длиной затвора ПТШ на основе GaAs и ёмкостями C_{gd} и C_{gs} ЭС малосигнальной модели транзистора, в то время как глубина подзатворного рецесса имеет значительное влияние на параметр C_{gs} , при этом вид зависимости приближён к экспоненциальному. В дальнейшем на основе полученных зависимостей планируется построение поведенческих регрес-

сионных моделей. Такие модели позволят при проектировании учесть технологический разброс параметров компонентов СВЧ МИС.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00293.

Литература

1. Nassif S.R. Modeling and analysis of manufacturing variations // Proc. Cust. Integr. Circuits Conf, 2001, pp. 223–228.
2. Multi-wafer virtual probe: Minimum-cost variation characterization by exploring wafer-to-wafer correlation / W. Zhang, X. Li, E. Acar, F. Liu, R. Rutenbar // IEEE ACM Int. Conf. Comput. Des. Dig. Tech. Pap. ICCAD, 2010, pp. 47–54.
3. A virtual metrology system for semiconductor manufacturing / P. Kang, H. Lee, S. Cho, D. Kim, J. Park, C. Park, S. Doh // Expert Syst. Appl. Elsevier Ltd, 2009, vol. 36, no. 10, pp. 12554–12561.
4. Nummila K., Delay time analysis for short gate-length GaAs MESFETs / K. Nummila, A.A. Ketterson, I. Adesida // Solid State Electron, 1995, vol. 38, no. 2, pp. 517–524.
5. Short-Channel Effects and Drain-Induced Barrier Lowering in Nano-meter-Scale GaAs MESFET's / A.A James, I.G. Thayne, C.D.W. Wilkinson, S.P. Beaumont, N.P. Johnson, A.H. Kean, C.R. Stanley // IEEE Trans. Electron Devices, 1993, vol. 40, no. 6, pp. 1047–1052.
6. Lakhdar N. Effect of gate engineering in submicron GaAs MESFET for microwave frequency applications / N. Lakhdar, B. Lakehal // J. Semicond, 2016, Vol. 37, no. 4.
7. Maiti C.K. Strain-engineered MOSFETs // C.K. Maiti, T.K. Maiti. – Boka-Raton: Taylor & Francis Group, 2013, 288 p.
8. Langer U. Scientific computing in electrical engineering / U. Langer, W. Amrhein, W. Zulehner // St. Wolfgang, Austria 2016, 263 p.
9. Добуш, И. М. Разработка методик и программ-

ного обеспечения для автоматического построения моделей базовых элементов СВЧ монолитных интегральных схем / И. М. Добуш [и др.] // Наноиндустрия. – 2019. – № спецвыпуск. – С. 453-462.

10. Saduki M. Approximate Formulas for the Capacitance of Microstrip Line / M. Saduki, S.M. Musa, S.R. Nelatury // Proceedings 2007 IEEE SoutheastCon, Richmond, VA, 2007, pp. 427–432.
11. Crupi G., On the small signal modeling of advanced microwave FETs: A comparative study / G. Crupi, D.M.M.P. Schreurs, A. Caddemi // Int. J. RF Microw. Comput. Eng, 2008, vol. 18, no. 5, pp. 417–425.
12. Jeon M. A Technique for Extracting Small-Signal Equivalent-Circuit Elements of HEMTs / M.Y. Jeon, B.G. Kim, Y.J. Jeon, Y.H. Jeong. // IEICE Trans. Electron, 1999, vol. E82-C, no. 11. pp. 1968–1976.

References

1. Nassif S. R. Modeling and analysis of manufacturing variations. Proc. Cust. Integr. Circuits Conf, 2001, pp. 223–228.
2. Zhang W., Li X., Acar E., Liu F., Rutenbar R. Multi-wafer virtual probe: Minimum-cost variation characterization by exploring wafer-to-wafer correlation. IEEE ACM Int. Conf. Comput. Des. Dig. Tech. Pap. ICCAD, 2010, pp. 47–54.
3. Kang P., Lee H., Cho S., Kim D., Park J., Park C., Doh S. A virtual metrology system for semiconductor manufacturing. Expert Syst. Appl. Elsevier Ltd, 2009, vol. 36, no. 10, pp. 12554–12561.
4. Nummila K., Ketterson A.A., Adesida I. Delay time analysis for short gate-length GaAs MESFETs. Solid State Electronics, 1995, vol. 38, no. 2, pp. 517–524.

5. James A.A., Thayne I.G., Wilkinson C.D.W., Beaumont S.P., Johnson N.P., Kean A.H., Stanley C.R. Short-Channel Effects and Drain-Induced Barrier Lowering in Nano-meter-Scale GaAs MESFET's. IEEE Trans. Electron Devices, 1993, vol. 40, no. 6, pp. 1047–1052.
6. Lakhdar N., Lakehal B. Effect of gate engineering in submicron GaAs MESFET for microwave frequency applications. *J. Semiconductor*, 2016, vol. 37, no. 4.
7. Maiti C.K., Maiti T.K. Strain-engineered MOSFETs. Boca-Raton: Taylor & Francis Group, 2013, 288 p.
8. Langer U., Amrhein W., Zulehner W. Scientific computing in electrical engineering. St. Wolfgang, Austria 2016, 263 p.
9. Dobush I. M. Razrabotka metodik i programmnoho obespecheniya dlya avtomaticheskogo postroeniya modelej bazovyh elementov SVCH monolitnyh integral'nyh skhem [Development of techniques and software for computer-assisted modeling of basic components of microwave monolithic integrated circuits]. Nanoindustry, 2019, no. special issue, pp. 453-462.
10. Saduki M., Musa S.M., Nelatury S.R. Approximate Formulas for the Capacitance of Microstrip Line. Proceedings 2007 IEEE SoutheastCon, Richmond, VA, 2007, pp. 427–432.
11. Crupi G., Schreurs D.M.M.P., Caddemi A. On the small signal modeling of advanced microwave FETs: A comparative study. *Int. J. RF Microw. Comput. Eng*, 2008, vol. 18, no. 5, pp. 417–425.
12. Jeon M.Y., Kim B.G., Jeon Y.J., Jeong Y.H. A Technique for Extracting Small-Signal Equivalent-Circuit Elements of HEMTs. IEICE Trans. Electronics, 1999, vol. E82-C, no. 11. pp. 1968–1976.