

Для цитирования: Исследование влияния параметров техпроцесса на электрофизические характеристики полевого транзистора с барьером Шоттки с применением приборно-технологического моделирования / А. А. Попов, Д. В. Билевич, А. С. Сальников, А. А. Калентьев // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 2. С. 23–30.
DOI 10.21778/2218-5453-2020-2-23-30
УДК 621.382.323

А. А. Попов¹, Д. В. Билевич¹, А. С. Сальников¹, А. А. Калентьев¹

¹ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХПРОЦЕССА НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИБОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ*

В статье представлены результаты исследования физико-технологической модели типового полевого транзистора с барьером Шоттки (ПТШ). Проведено моделирование пробивных характеристик ПТШ при различных параметрах подзатворного углубления. Представлено сравнение диаграмм скорости генерации горячих носителей для плоской структуры ПТШ и структуры с подзатворным углублением. Получена зависимость напряжения пробоя стока от глубины подзатворного углубления. Также в работе предложен новый подход, позволяющий установить взаимосвязь между параметрами ионной имплантации контактных областей и канала ПТШ и внутренними емкостями малосигнальной эквивалентной схемы транзистора. Данный подход основан на перспективном направлении контроля, называемом виртуальной метрологией, где параметры технологического процесса используются для предсказания критических параметров, характеризующих его результат. Для реализации данного подхода построены предиктивные модели на основе четырех популярных методов машинного обучения: линейной регрессии, машины опорных векторов, искусственной нейронной сети и композиции решающих деревьев.

Ключевые слова: физико-технологическая модель, эффект пробоя, виртуальная метрология, машинное обучение

Введение

Полевые транзисторы с барьером Шоттки (ПТШ) на основе арсенида галлия широко используются в монолитных интегральных схемах быстродействующих переключателей и усилителей мощности, предназначенных для создания устройств беспроводной передачи данных, сотовой связи, радиолокации и радионавигации. Особое значение имеют мощные ПТШ, так как на их основе можно конструировать как аналоговые, так и цифровые системы радиосвязи.

Технология производства ПТШ складывается из множества технологических операций, для качественного проведения которых требуется современное оборудование. Однако, ввиду дороговизны проведения экспериментов по отладке технологии изготовления полупроводниковых приборов, в современной практике используются методы физико-технологического моделирования с целью

предварительной оценки параметров технологических процессов и поиска оптимальных конструктивных решений для отдельных элементов приборов.

Например, при конструировании мощных ПТШ необходимо обеспечить высокие значения напряжения пробоя стока и тока насыщения [1]. В свою очередь, пробивное напряжение сток-исток в значительной степени зависит от базовой структуры ПТШ. Большинство серийных маломощных ПТШ имеют структуру плоского типа [2], но при попытке реализовать мощные ПТШ данного типа было установлено, что приборы с такой структурой обладают низкими напряжениями пробоя стока и не обеспечивают стабильную работу [3]. Впоследствии были предложены различные варианты структур и технологии их получения, позволяющие значительно улучшить мощностные характеристики транзисторов [4–7]. Однако предложенные ранее конфигурации структур мощных ПТШ были получены

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

с помощью эвристических и опытных подходов, в которых физическое обоснование улучшения мощностных параметров практически не представлено. В данной работе для исследования эффекта пробоя стока в распространенной структуре мощного ПТШ с подзатворным углублением использовалось физико-технологическое моделирование, что позволило детально рассмотреть процессы генерации горячих носителей в области затвора со стороны стока.

Наряду с особенностями конструкций полупроводниковых приборов особое внимание уделяется контролю технологических процессов их изготовления. На протяжении всего производственного цикла измеряются наиболее критичные параметры, например, толщина пленки после CVD-осаждения [8] или ошибка совмещения фотошаблона и подложки при проведении литографии [9]. От качества контроля критичных параметров зависят такие важные показатели производительности, как объем производства и процент выхода годной продукции, а также пропускная способность производственной линии.

Согласно [10], существуют две основные стратегии измерения ключевых параметров процесса. Первая стратегия реализуется в виде интегрированного метрологического модуля (ИММ), когда прецизионное измерительное оборудование устанавливается непосредственно в технологическую установку. Вторая стратегия предполагает, что полупроводниковые пластины после проведения определенного технологического процесса отправляются на отдельный метрологический участок.

При использовании ИММ условия и параметры техпроцесса непрерывно корректируются, поскольку контролю подвергаются все обрабатываемые подложки. Несмотря на высокую стоимость и продолжительность производственного цикла, данный подход обеспечивает качественный контроль техпроцесса и используется на наиболее критичных этапах всего технологического маршрута [11]. В случае измерения параметров процесса на отдельном метрологическом участке используются лишь некоторые пластины из партии, так как на измерение критичных параметров за пределами технологического оборудования требуется больше времени. В зависимости от технологического оборудования, требований к продукту и важности процесса специалист по контролю устанавливает определенную частоту выборки контрольных пластин [12]. Однако при использовании такой схемы контроля параметры процесса обновляются не сразу после измерения критического параметра, что затрудняет своевременное обнаружение нарушений в техпроцессе и сказывается на качестве итогового продукта [13]. Для обеспечения баланса

между затрачиваемым временем, количеством контролируемых пластин и стоимостью операций контроля была предложена виртуальная метрология.

Виртуальная метрология использует математические модели и доступные данные о техпроцессе для оценки и контроля критических параметров. За последние десять лет было предложено множество подходов и сфер применения виртуальной метрологии в полупроводниковом производстве. Наибольшее применение данный подход нашел в технологии CVD-осаждения, где для построения предсказательной модели использовались следующие методы: нейронные сети на основе радиальной базисной функции [14]; множественная линейная регрессия [13]; рекуррентные нейронные сети [15]; композиция решающих деревьев [16]. Тем не менее впоследствии виртуальная метрология стала применяться и в других технологических процессах, включая химико-механическую полировку [17], травление [18] и литографию [19].

В данном исследовании подход виртуальной метрологии был распространен на параметры малосигнальной модели ПТШ. Традиционно такие модели ПТШ используются для проектирования интегральных схем, а также для исследования и корректирования параметров технологического процесса. Параметры моделей рассчитываются из результатов измерений электрофизических характеристик транзистора и далее используются в качестве индикаторов при настройке параметров процесса. Основываясь на предложенных ранее принципах виртуальной метрологии, в данной работе исследовалась взаимосвязь между параметрами имплантации канала и контактных областей ПТШ и параметрами его малосигнальной модели. Для этого с помощью физико-технологического и приборного моделирования были реализованы процесс формирования канала и контактных областей ПТШ, а также расчет параметров рассеяния транзистора.

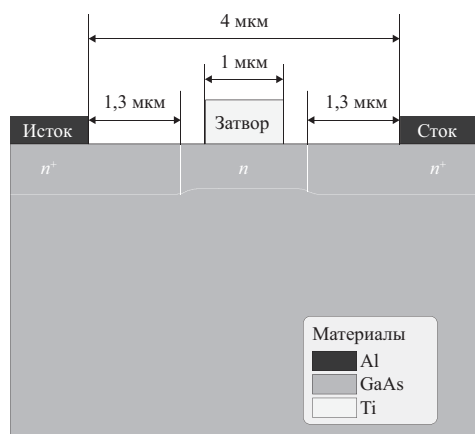
Физико-технологическая модель ПТШ

Для проведения численных экспериментов с помощью приборного моделирования была реализована типовая структура ПТШ на подложке GaAs. Для проведения экспериментов по построению предиктивных моделей также было реализовано физико-технологическое моделирование формирования канала и контактных областей ПТШ. На первом этапе проводилось моделирование процесса имплантации ионов бериллия для обеспечения необходимой исходной концентрации акцепторной примеси в подложке. Канал n -типа был сформирован путем имплантации ионов кремния. Далее был сформирован затвор из титана длиной 1 мкм. Сильнолегированные контактные области стока и истока

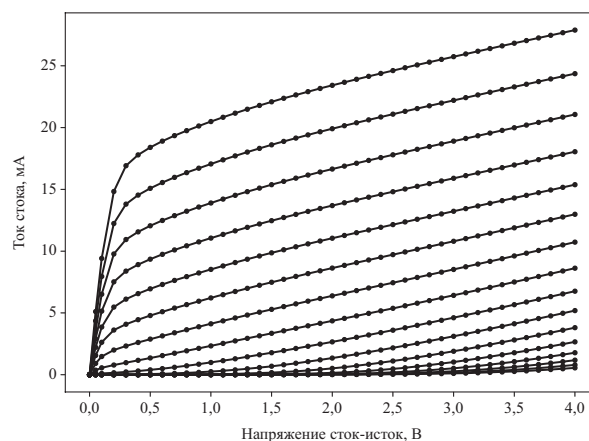
были реализованы с помощью ионной имплантации кремния. В качестве материала электродов истока и стока использовался алюминий. Итоговая структура ПТШ с характерными геометрическими размерами, а также результаты моделирования семейства выходных вольт-амперных характеристик представлены на рис. 1.

Моделирование пробивных характеристик ПТШ

Реализованная физико-технологическая модель использовалась для исследования влияния параметров подзатворного углубления на пробивные характеристики ПТШ. Для этого в ходе экспериментов в исходной структуре ПТШ формировалось подзатворное углубление (реcess) и рассчитывалось напряжение пробоя стока. Структура ПТШ с recessом глубиной 0,27 мкм представлена на рис. 2.



а)



б)

Рисунок 1. Структура поперечного сечения полевого транзистора с затвором Шоттки (а) и семейство выходных вольт-амперных характеристик при $U_{зи}$ от $-1,2$ В до $0,4$ В с шагом $0,1$ В (б): n^+ – сильнолегированные контактные области истока/стока; n – область канала n -типа

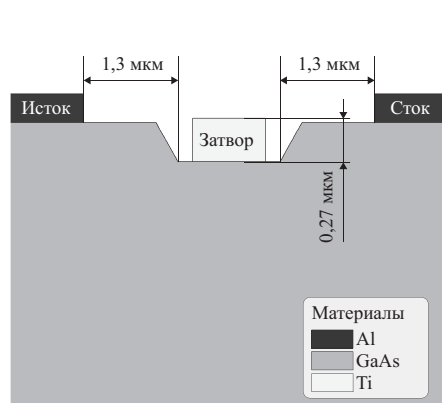


Рисунок 2. Структура моделируемого полевого транзистора с затвором Шоттки с recessом

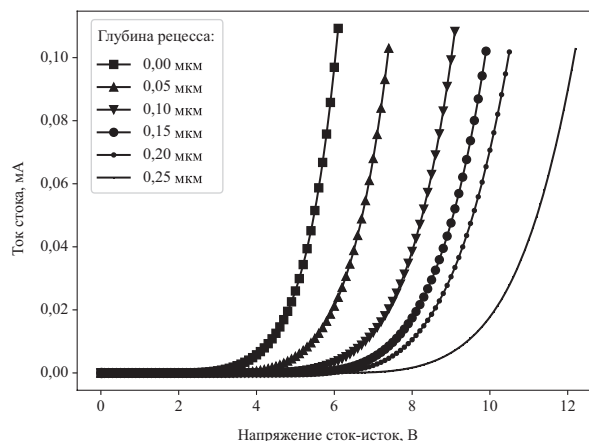


Рисунок 3. Пробивные характеристики стока для структур полевого транзистора с затвором Шоттки с различной глубиной recessа

Для каждой из структур был построен график скорости генерации носителей в результате ударной ионизации в сечении, как показано на рис. 4.

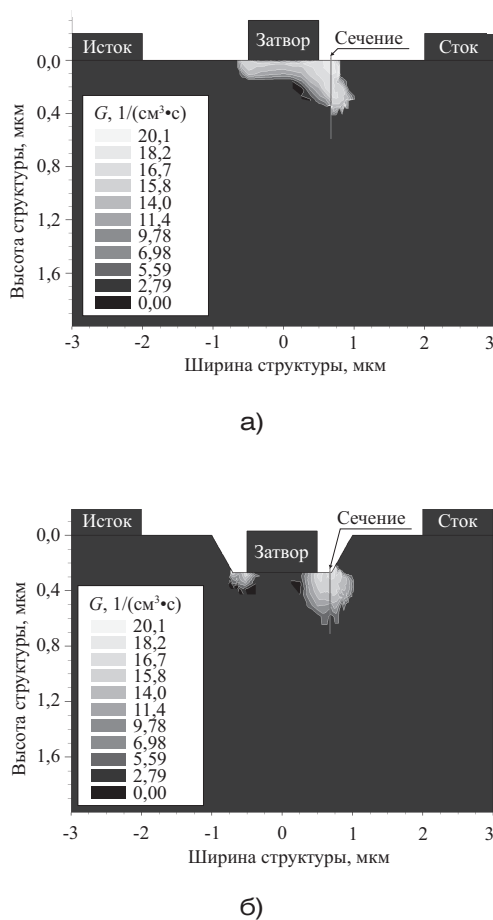


Рисунок 4. Диаграммы скорости генерации носителей заряда в результате ударной ионизации при $U_{СИ} = 6,1$ В в плоской структуре (а) полевого транзистора с затвором Шоттки и в структуре с рецессом глубиной $0,27$ мкм (б): G – скорость генерации горячих носителей в результате ударной ионизации

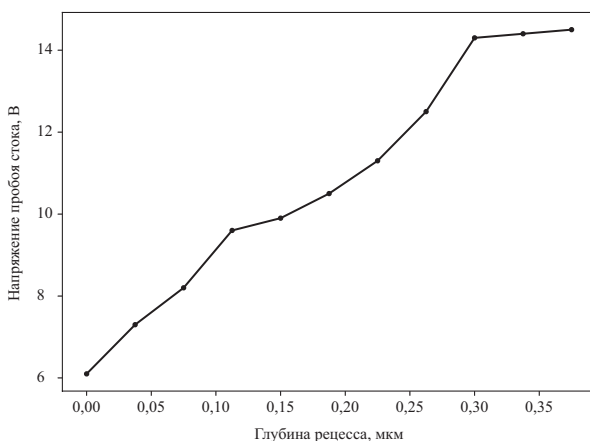


Рисунок 5. Зависимость пробивного напряжения стока от глубины рецесса

При указанном напряжении максимальное значение G для плоской структуры ПТШ составляет $3,6 \cdot 10^{19}$ см⁻³/с, в то время как для структуры с рецессом глубиной $0,27$ мкм скорость генерации носителей при $U_{СИ} = 6,1$ В не превышает $3,3 \cdot 10^{15}$ см⁻³/с.

Полученные значения скорости генерации носителей вблизи области пространственного заряда барьера Шоттки также свидетельствуют о том, что при $U_{СИ} = 6,1$ В в структуре ПТШ с рецессом явление пробоя стока не наблюдается в отличие от плоской структуры ПТШ. Повышение пробивного напряжения с увеличением глубины рецесса может быть связано с уменьшением концентрации носителей в активном слое транзистора, поскольку в результате ионной имплантации концентрация примеси в канале распределяется неравномерно.

При исследовании влияния подзатворного углубления на пробивные характеристики ПТШ также была получена зависимость, представленная на рис. 5. Характер полученной зависимости пробивного напряжения стока от глубины рецесса соответствует представленным ранее практическим результатам [7]. С увеличением глубины рецесса пробивное напряжение стока возрастает и выходит в насыщение, поскольку глубина рецесса становится соизмеримой или большей толщины активного слоя транзистора, где концентрация носителей изменяется незначительно.

Построение предиктивных моделей

Для построения предиктивных моделей, позволяющих выявить взаимосвязь между параметрами ионной имплантации и характеристиками мало-сигнальной эквивалентной схемы ПТШ, также использовалась реализованная физико-технологическая модель ПТШ. В частности, был проведен малосигнальный анализ модели ПТШ в диапазоне частот от $0,01$ до 12 ГГц. Экстракция параметров эквивалентной схемы [20], изображенной на рис. 6, проводилась с использованием результатов моделирования параметров рассеяния в рабочей точке $U_{СИ} = 3$ В, $U_{ЗИ} = 0,2$ В. Представленная эквивалентная схема соответствует внутренней схеме транзистора, где внешние паразитные элементы исключены, так как в процессе приборного моделирования не учитывается влияние контактных площадок и подводящих линий.

Для установления взаимосвязи между параметрами эквивалентной схемы и техпроцесса изготовления транзистора была проведена серия экспериментов с различными значениями дозы и энергии всех этапов ионной имплантации. Параметры эквивалентной схемы транзистора рассчитывались из смоделированных параметров рассеяния. Далее в целях демонстрации все формулы и результаты построения предиктивных моделей будут

представлены только для емкостей эквивалентной схемы. Однако подобные эксперименты могут быть проведены с использованием всех внутренних параметров. Емкости эквивалентной схемы могут быть рассчитаны из матрицы малосигнальных Y -параметров, используя следующие выражения:

$$C_{зи} = \frac{1}{\omega \operatorname{Im} \left(\frac{1}{Y_{11} + Y_{12}} \right)}, \quad (1)$$

$$C_{зс} = \frac{1}{\omega \operatorname{Im} \left(\frac{1}{Y_{12}} \right)}, \quad (2)$$

$$C_{си} = \frac{\operatorname{Im}(Y_{12} + Y_{22})}{\omega}, \quad (3)$$

где ω – циклическая частота.

Используемые для расчета Y -параметры могут быть получены путем пересчета параметров рассеяния с помощью известных соотношений. Приведенные выражения позволяют рассчитать значения емкостей в каждой частотной точке. Для получения окончательного значения емкости в данной работе использовалось обыкновенное усреднение всех рассчитанных значений по частоте.

Входными данными для обучения моделей выступали параметры ионной имплантации, которые изменялись в ходе физико-технологического моделирования. Полученные в результате экстракции значения емкостей $C_{зи}$, $C_{зс}$ и $C_{си}$ использовались в качестве ответов (выходных параметров). Предиктивная модель связывает между собой значения входных параметров и ответов, используя для этого популярные в области виртуальной метрологии регрессионные методы: линейную регрессию, машину опорных векторов, искусственную нейронную сеть и композицию решающих деревьев. Таким образом, каждый из указанных методов является математической основой работы для своей предиктивной модели.

В случае построения предиктивных моделей каждый из перечисленных методов машинного обучения представляет собой модель в виде черного ящика, имеющую входные и выходные параметры. Задача обучения сводится к определению таких внутренних параметров модели, при использовании которых черный ящик преобразует входные данные в выходные с минимально допустимым значением ошибки. Таким образом, для обучения модели требуется некоторая обучающая выборка, в которой содержатся входные данные (признаки) и соответствующие им выходные данные (ответы). Следует отметить, что для каждого из методов машинного обучения используется определенный алгоритм расчета внутренних параметров модели.

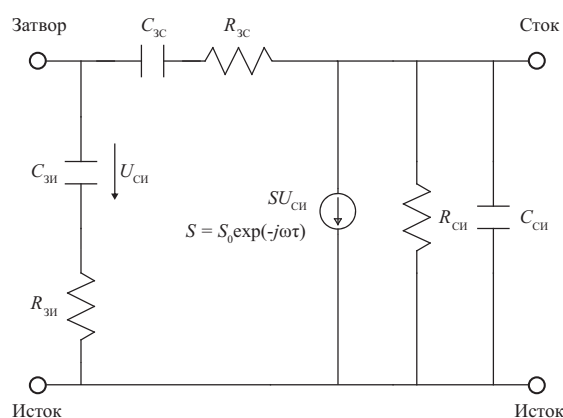


Рисунок 6. Малосигнальная эквивалентная схема: S – крутизна транзистора; S_0 – крутизна транзистора на постоянном токе; ω – циклическая частота; τ – время задержки

Например, в случае линейной регрессии наиболее распространенным алгоритмом обучения является метод наименьших квадратов, в то время как для искусственной нейронной сети используют алгоритм обратного распространения ошибки.

Для того чтобы порядки входных величин не влияли на результат обучения, было применено автошкалирование данных. В ходе исследования было установлено, что для обучения адекватных регрессионных моделей также необходимо применять шкалирование выходных данных, если они имеют малый порядок величин. На рис. 7 представлено сравнение результатов обучения регрессионной модели на основе искусственной нейронной сети. В первом случае (рис. 7а), когда обучение проводилось без предварительного шкалирования ответов, модель не способна предсказывать значения емкостей, рассчитанные из смоделированных параметров рассеяния. Во втором случае (рис. 7б) коэффициент детерминации обученной модели $R^2 = 0,78$, что подтверждает, что полученная модель способна описывать взаимосвязь между параметрами ионной имплантации и значениями емкостей малосигнальной модели. Для повышения точности моделей был проведен сеточный поиск оптимальных параметров, при которых достигается наибольшее значение коэффициента детерминации. В процессе поиска использовалась трехкратная кросс-валидация во избежание переобучения модели.

После определения оптимальных параметров вся исходная выборка данных была разделена на обучающую и контрольную. Обучение моделей с оптимальными параметрами проводилось с использованием обучающей выборки. Оценка качества моделей осуществлялась с помощью данных контрольной выборки по значению коэффициента детерминации R^2 . В таблице представлены значения R^2 для всех

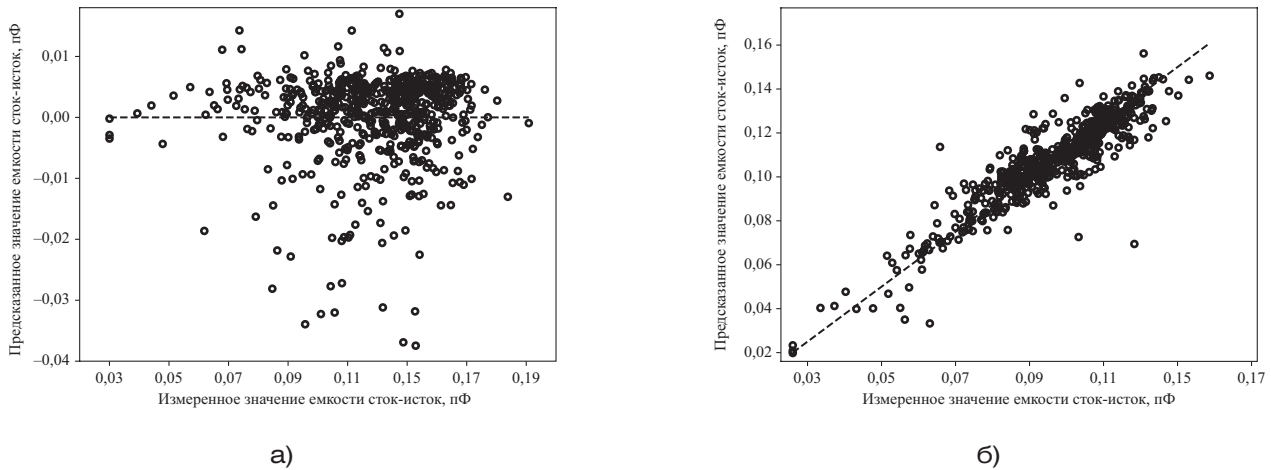


Рисунок 7. Результат обучения регрессионной модели на основе нейронной сети без предварительного шкалирования ответов (а) и с предварительным шкалированием ответов (б)

регрессионных моделей с оптимальными параметрами, полученными в результате сеточного поиска.

Анализ полученных значений коэффициента детерминации показывает, что нелинейные методы регрессии способны установить взаимосвязь между параметрами ионной имплантации и емкостью $C_{СИ}$, поскольку каждая из нелинейных предиктивных моделей обладает коэффициентом детерминации более 0,75. В то же время наиболее точным среди всех использованных методов является искусственная нейронная сеть, обученная с помощью алгоритма обратного распространения ошибки. Кроме того, полученные результаты свидетельствуют, что данных о техпроцессе ионной имплантации недостаточно для установления взаимосвязи между параметрами процесса и значениями емкостей $C_{ЗС}$ и $C_{ЗИ}$. В дальнейшем предложенный подход может быть исследован с применением данных о других техпроцессах, применяющихся при изготовлении ПТШ на основе GaAs, а также с помощью генерации новых признаков для обучения предиктивной модели на основе уже имеющихся данных.

Заключение

В работе представлены результаты физико-технологического и приборного моделирования типового GaAs ПТШ. Полученная модель

использовалась для исследования пробивных характеристик транзистора, а также для установления взаимосвязи между параметрами процесса ионной имплантации и параметрами малосигнальной эквивалентной схемы. В ходе численных экспериментов была определена максимальная глубина рецесса, влияющая на повышение пробивного напряжения стока. Также было установлено, что максимальная скорость генерации горячих носителей в области пространственного заряда барьера Шоттки для плоской структуры ПТШ значительно выше по сравнению со скоростью генерации в структуре с рецессом. Используя данные, полученные в ходе моделирования процесса ионной имплантации и малосигнального анализа физико-технологической модели, были обучены регрессионные методы на основе четырех наиболее популярных методов машинного обучения. Установлено, что нелинейные регрессионные модели способны выявлять взаимосвязь между параметрами ионной имплантации и значениями емкости $C_{СИ}$, полученной в результате экстракции параметров малосигнальной эквивалентной схемы транзистора. Дальнейшие исследования будут направлены на выявление взаимосвязей между данными о других технологических процессах и остальными параметрами малосигнальной эквивалентной схемы.

Таблица. Коэффициент детерминации полученных регрессионных моделей для различных емкостей

Тип емкости малосигнальной модели	Значения коэффициента детерминации R^2			
	Линейная регрессия	Машина опорных векторов	Искусственная нейронная сеть	Композиция решающих деревьев
$C_{СИ}$	0,56	0,76	0,86	0,79
$C_{ЗС}$	0,03	0,006	0,51	0,21
$C_{ЗИ}$	0,004	0,17	0,83	0,49

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Drukier I., Wade P. C., Thompson J. W. A high power 15GHz GaAs FET. 9th European Microwave Conference, 1979. Brighton, UK. P. 282–286.
2. Ogawa M., et al. Submicron single-gate and dual-gate GaAs MESFET's with improved low noise and high gain performance // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1976. Vol. 24. No. 6. P. 300–305.
3. Fukuta M., et al. Mesh source type microwave power FET. IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers. Philadelphia, PA, USA, 1973. P. 84–85.
4. Fukuta M., et al. X-band GaAs Schottky barrier power FET with a high drain source breakdown voltage. IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of technical papers. Philadelphia, PA, USA, 1976. P. 166–167.
5. Stoneham E., Tan T.S., Gladstone J. Fully ion implanted GaAs power FETs. International Electron Devices Meeting. Washington, DC, USA, 1977. P. 330–333.
6. Hasegawa F., et al. GaAs power MEWFETs with a simplified recess structure. IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of technical papers. San Francisco, CA, USA, 1978. P. 118–119.
7. Furutsuka T., et al. GaAs power m.e.s.f.e.t.s. with a graded recess structure // Electron. Lett. 1979. Vol. 15. No. 14. P. 417–418.
8. Kim S.J., et al. Thickness control of chemical vapor deposition-grown graphene film by oxygen plasma etching with recycled use of Ni catalyst // J. Nanosci. Nanotechnol. 2017. Vol. 17. No. 7. P. 4907–4913.
9. Maas J., et al. YieldStar: a new metrology platform for advanced lithography control. Proc. SPIE7985, 27th European Mask and Lithography Conference, 2011. 79850H.
10. Jebri M.A., et al. The Impact of the virtual metrology on a run-to-run control for a chemical mechanical planarization process // IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50. No. 1. P. 6154–6159.
11. Ho W.K., et al. Integrated metrology and processes for semiconductor manufacturing. 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005 (IECON2005). 6 p.
12. Elliott R.C., et al. Critical dimension sample planning for sub-0.25 micron processes. 10th Annual IEEE/SEMI. Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop, 1999. P. 139–142.
13. Pan J.C.-H., Tai D.H. Implementing virtual metrology for in-line quality control in semiconductor manufacturing // Int. J. Syst. Sci. 2009. Vol. 40. No. 5. P. 461–470.
14. Lin T.-H., et al. A virtual metrology scheme for predicting CVD thickness in semiconductor manufacturing. Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006 (ICRA 2006). P. 1054–1059.
15. Su Y.-C., et al. Accuracy and real-time considerations for implementing various virtual metrology algorithms // IEEE Trans. Semicond. Manuf. 2008. Vol. 21. No. 3. P. 426–434.
16. Besnard J., et al. Virtual metrology modeling for CVD film thickness // Int. J. Control Sci. Eng. 2012. Vol. 2. No. 3. P. 26–33.
17. Jebri M.A., et al. Virtual metrology applied in run-to-run control for a chemical mechanical planarization process // J. Phys. Conf. Ser. 2017. Vol. 783. P. 012042.
18. Lynn S.A., MacGearailt N., Ringwood J.V. Real-time virtual metrology and control for plasma etch // J. Process Control. 2012. Vol. 22. No. 4. P. 666–676.
19. Kang P., et al. Virtual metrology for run-to-run control in semiconductor manufacturing // Expert Syst. Appl. 2011. Vol. 38. No. 3. P. 2508–2522.
20. Rorsman N., et al. Accurate small-signal modeling of HFET's for millimeter-wave applications // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1996. Vol. 44. No. 3. P. 432–437.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Попов Артем Александрович, младший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», Российская Федерация, 634050, Томск, пр. Ленина, 40, тел.: 8 (913) 880-78-12, e-mail: artem.a.popov@tusur.ru.

Билевич Дмитрий Вячеславович, младший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», Российская Федерация, 634050, Томск, пр. Ленина, 40, тел.: 8 (983) 053-03-63, e-mail: dmitrii.v.bilevich@tusur.ru.

Сальников Андрей Сергеевич, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», Российская Федерация, 634050, Томск, пр. Ленина, 40, тел.: 8 (913) 866-44-65, e-mail: andrei.salnikov@main.tusur.ru.

Калентьев Алексей Анатольевич, к.т.н., старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», Российская Федерация, 634050, Томск, пр. Ленина, 40, тел.: 8 (923) 408-04-08, e-mail: aleksei.a.kalentyev@tusur.ru.

For citation: Popov A. A., Bilevich D. V., Salnikov A. S., Kalentyev A. A. A study of technology parameters influence on the electrophysical characteristics of a MESFET using TCAD simulations. Issues of radio electronics, 2020, no. 2, pp. 23–30.

DOI 10.21778/2218-5453-2020-2-23-30

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

A STUDY OF TECHNOLOGY PARAMETERS INFLUENCE ON THE ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF A MESFET USING TCAD SIMULATIONS

The research results of the TCAD model of a typical MESFET are considered. Modeling of breakdown IV-curves with various parameters of a gate recess was carried out and corresponding diagrams for impact ionization rate of hot carriers both in flat and

recessed MESFET structures were derived. As a result, a curve of breakdown drain voltage versus recess depth was obtained. Also, a new approach to determine an interrelationship between ion implantation parameters of the MESFET channel and contact regions and the intrinsic capacitances of a transistor small-signal model is demonstrated. The approach is based on the promising process control direction called virtual metrology, where critical process variables are predicted using input process parameters such as sensor data. In order to implement a new approach, the four predictive models were built using the following popular machine learning algorithms: linear regression, support vector regression, artificial neural network and decision tree ensembles.

Keywords: MESFET, TCAD model, breakdown, virtual metrology, machine learning

REFERENCES

1. Drukier I., Wade P. C., Thompson J. W. A high power 15GHz GaAs FET. 9th European Microwave Conference, 1979, Brighton, UK, pp. 282–286.
2. Ogawa M., et al. Submicron single-gate and dual-gate GaAs MESFET's with improved low noise and high gain performance. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech*, 1976, vol. 24, no. 6, pp. 300–305.
3. Fukuta M., et al. Mesh source type microwave power FET. IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of Technical Papers. Philadelphia, PA, USA, 1973, pp. 84–85.
4. Fukuta M., et al. X-band GaAs Schottky barrier power FET with a high drain source breakdown voltage. IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of technical papers. Philadelphia, PA, USA, 1976, pp. 166–167.
5. Stoneham E., Tan T. S., Gladstone J. Fully ion implanted GaAs power FETs. International Electron Devices Meeting, Washington, DC, USA, 1977, pp. 330–333.
6. Hasegawa F., et al. GaAs power MEWLETs with a simplified recess structure. IEEE International Solid-State Circuits Conference. Digest of technical papers. San Francisco, CA, USA, 1978, pp. 118–119.
7. Furutsuka T., et al. GaAs power m.e.s.f.e.t.s. with a graded recess structure. *Electron. Lett.*, 1979, vol. 15, no. 14, pp. 417–418.
8. Kim S. J., et al. Thickness control of chemical vapor deposition-grown graphene film by oxygen plasma etching with recycled use of Ni catalyst. *J. Nanosci. Nanotechnol.*, 2017, vol. 17, no. 7, pp. 4907–4913.
9. Maas J., et al. YieldStar: a new metrology platform for advanced lithography control. Proc. SPIE7985, 27th European Mask and Lithography Conference, 2011, 79850H.
10. Jebri M. A., et al. The Impact of the virtual metrology on a run-to-run control for a chemical mechanical planarization process. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, vol. 50, no. 1, pp. 6154–6159.
11. Ho W. K., et al. Integrated metrology and processes for semiconductor manufacturing. 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005 (IECON2005), 6 p.
12. Elliott R. C., et al. Critical dimension sample planning for sub-0.25 micron processes. 10th Annual IEEE/SEMI, Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop, 1999, pp. 139–142.
13. Pan J. C.-H., Tai D. H. Implementing virtual metrology for in-line quality control in semiconductor manufacturing. *Int. J. Syst. Sci.*, 2009, vol. 40, no. 5, pp. 461–470.
14. Lin T.-H., et al. A virtual metrology scheme for predicting CVD thickness in semiconductor manufacturing. Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006 (ICRA 2006), pp. 1054–1059.
15. Su Y.-C., et al. Accuracy and real-time considerations for implementing various virtual metrology algorithms. *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, 2008, vol. 21, no. 3, pp. 426–434.
16. Besnard J., et al. Virtual metrology modeling for CVD film thickness. *Int. J. Control Sci. Eng.*, 2012, vol. 2, no. 3, pp. 26–33.
17. Jebri M. A., et al. Virtual metrology applied in run-to-run control for a chemical mechanical planarization process. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2017, vol. 783, p. 012042.
18. Lynn S. A., MacGearailt N., Ringwood J. V. Real-time virtual metrology and control for plasma etch. *J. Process Control*, 2012, vol. 22, no. 4, pp. 666–676.
19. Kang P., et al. Virtual metrology for run-to-run control in semiconductor manufacturing. *Expert Syst. Appl.*, 2011, vol. 38, no. 3, pp. 2508–2522.
20. Rorsman N., et al. Accurate small-signal modeling of HFET's for millimeter-wave applications. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 1996, vol. 44, no. 3, pp. 432–437.

AUTHORS

Popov Artem, junior researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation, tel.: +7 (913) 880-78-12, e-mail: artem.a.popov@tusur.ru.

Bilevich Dmitry, junior researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation, tel.: +7 (983) 053-03-63, e-mail: dmitrii.v.bilevich@tusur.ru.

Salnikov Andrei, Ph. D., associate professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation, tel.: +7 (913) 866-44-65, e-mail: andrei.salnikov@main.tusur.ru.

Kalentyev Alexey, Ph. D., senior researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russian Federation, tel.: +7 (923) 408-04-08, e-mail: aleksei.a.kalentev@tusur.ru.