

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Алексева Романа Павловича «**Влияние конструктивно-технологических факторов на насыщение вольт-амперных характеристик мощных СВЧ LDMOS-транзисторов**», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

**Актуальность темы диссертации.** В диссертации рассматривается проблема улучшения электрических характеристик мощных СВЧ LDMOS-транзисторов. Существует большое количество вариантов конструкций LDMOS-транзисторов, они изготавливаются серийно на отечественных и зарубежных предприятиях. В данной работе для серийно выпускаемых изделий АО «НИИЭТ» (г. Воронеж) решается задача минимизации эффекта квазинасыщения вольт-амперных характеристик (ВАХ), так как данный эффект способен привести к ухудшению параметров транзисторов данного типа и негативно сказаться на их надежности.

СВЧ LDMOS транзисторы получили широкую известность и распространение в начале 2000-х годов. В силу своих преимуществ LDMOS технология до сих пор является наиболее актуальной технологией создания мощных СВЧ кремниевых транзисторов.

Несмотря на появление в последнее время приборов на основе широкозонных полупроводниковых материалов, в диапазоне рабочих частот до 3 ГГц кремниевые LDMOS транзисторы продолжают занимать значительную долю рынка как в России, так и за рубежом, благодаря хорошему соотношению цена-качество и высокой воспроизводимости технологического процесса.

LDMOS транзисторы применяются в усилителях сигнала базовых станции сотовой связи, радиолокационных станций наземного и воздушного

базирования, систем навигации, радиопередатчиков цифрового телевидения, средствах радиоэлектронной борьбы, дальномерной аппаратуре и системах предотвращения столкновения самолетов.

Таким образом, тема диссертации является актуальной.

### **Общая характеристики диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Во введении, обоснована актуальность исследования, обозначены проблемы, решаемые в диссертации, сформулированы цели и задачи, приведены основные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава представляет собой обзор литературы по конструкциям и физике работы LDMOS-транзисторов. Приведены проблемы, возникающие при проектировании данного типа приборов, и известные пути их решения. Особое внимание уделено описанию механизма эффекта квазинасыщения вольт-амперных характеристик, приведены модели, объясняющие данный эффект.

Во второй главе описаны возможности САПР Sentaurus TCAD, его состав, преимущества и последовательность этапов моделирования. Большая часть главы посвящена описанию стандартных моделей технологических процессов и физических эффектов, которые подключаются к проекту при моделировании структуры и ВАХ транзистора.

В третьей главе представлены результаты моделирования различных конструкций LDMOS-транзистора, предлагаемых автором. Введен параметр  $\Delta I_{D20-40}/I_{d20}$ , по которому оценивается влияние конструктивно-технологических факторов на насыщение ВАХ. В конце главы выбраны 4 варианта конструкции, позволяющие минимизировать эффект квазинасыщения ВАХ.

В четвертой главе представлены результаты измерения электрических параметров транзистора, конструкция которого разработана на основе результатов моделирования из главы 3. Транзистор новой конструкции



обладает лучшими характеристиками по сравнению с базовым вариантом. Эффект квазинасыщения значительно снижен. Разработанная конструкция внедрена в производственный процесс АО «НИИЭТ».

**Научная новизна.** Наиболее значимыми с научной точки зрения результатами являются следующие:

– показано, что квазинасыщение, являясь результатом сложных физических процессов, зависит от многих конструктивных параметров LDMOS транзисторов, при этом основным фактором этой зависимости выступает влияние этих параметров на распределение напряженности электрического поля в LDD-области;

– установлено, что наибольшим влиянием на характер квазинасыщения среди всех конструктивных и технологических параметров LDMOS транзистора обладают глубина истоковой области p-типа проводимости, толщина подзатворного диэлектрика, конструкция и длина перекрытия полевого электрода, концентрация примеси в LDD-области и ее длина, при этом для оптимизации конструкции с точки зрения минимизации степени выраженности квазинасыщения могут использоваться только параметры полевого электрода и LDD-области;

– проведен анализ ряда конструкций LDMOS транзистора и установлено, что с точки зрения снижения квазинасыщения наиболее перспективной конструкцией LDMOS транзистора является конструкция, включающая двойной полевой электрод и высоколегированный участок LDD-области, примыкающий к стоковому краю.

Таким образом, результаты диссертации обладают достаточной научной новизной.

**Практическая значимость.** Диссертация направлена на решение конкретной практической задачи: подавление квазинасыщения в мощных СВЧ LDMOS транзисторах. Полученные в ходе выполнения работы данные о механизме квазинасыщения и способах его подавления были учтены при разработке нового транзисторного кристалла, ВАХ которого

характеризуются значительно меньшим проявлением квазинасыщения по сравнению с ВАХ существующего отечественного транзисторного кристалла и кристалла зарубежного производства.

Разработана модель LDMOS-транзистора в САПР Sentaurus TCAD. Подходы к моделированию структуры транзистора, показанные в работе, могут быть использованы для дальнейшего улучшения конструкций серийно изготавливаемых приборов.

Практическая реализация результатов диссертации подтверждается актом о внедрении результатов диссертации АО «НИИЭТ», а также свидетельством о государственной регистрации топологии.

Таким образом, диссертация обладает достаточной практической значимостью.

**Достоверность и обоснованность результатов.** Достоверность результатов диссертации обеспечивается использованием для численного моделирования LDMOS транзисторов САПР Sentaurus TCAD актуальной версии. Измерение электрических параметров транзисторов проводилось на стандартном верифицированном контрольно-измерительном оборудовании.

Выводы диссертации подтверждены на практике путем измерения электрических параметров реальных LDMOS транзисторов производства АО «НИИЭТ».

Основные результаты диссертации опубликованы в 19 научных работах, 4 из которых изданы в научных изданиях, рекомендованных ВАК, получено 3 свидетельства о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы. Результаты работы апробированы на конференциях различного уровня.

Таким образом, результаты диссертации являются достоверными и обоснованными.



Вместе с тем, работа не лишена недостатков. Можно выделить следующие **замечания**:

1. Первые две главы работы представляют собой теоретические сведения по эффекту квазинасыщения ВАХ и моделям TCAD и занимают значительную часть работы. В то же время в главе 4 недостаточно подробно описана конструкция разработанного прибора.

2. Автор не приводит конкретные геометрические размеры и структуру транзисторов, изготовленных по новой конструкции. Для модели в TCAD размеры, за исключением LDD-области, также в работе не приводятся.

3. Диапазон напряжений при моделировании и измерении ВАХ реальных приборов не совпадают. В главе 3 приводится параметр  $\Delta I_{D20-40}/I_{d20}$ , а в главе 4  $\Delta I_{D8-10}/I_{d8}$ , что затрудняет сравнение результатов моделирования и ВАХ реальных приборов.

4. В работе присутствуют опечатки, например, в разделе «объекты исследования» один пункт повторяется два раза.

Указанные замечания не снижают научную, практическую значимость и итоговую положительную оценку диссертации.

**Итоговое заключение по работе.** Рассматривая диссертацию Алексеева Р.П. в целом, следует отметить, что она является законченной научно-исследовательской работой, обладающей новизной и актуальностью. Материал изложен обосновано, в логическом порядке. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация является хорошим примером современного проектирования изделий ЭКБ, которое осуществляется с применением технологических САПР. На основе технологического моделирования нескольких вариантов конструкций, выбрана оптимальная. Далее на основе выбранной конструкции были внесены изменения в серийно выпускаемые приборы.

Содержание диссертации, приведенные результаты, сделанные выводы и выдвигаемые на защиту положения соответствуют паспорту научной

специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

Диссертация соответствует требованиям Постановления Правительства РФ «О порядке присуждения ученых степеней», а ее автор Алексеев Роман Павлович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств.

Официальный оппонент: доцент кафедры твердотельной электроники ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» кандидат технических наук (научная специальность 05.27.01. Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нано- электроника, приборы на квантовых эффектах)

Винокуров Александр Александрович

25.04.2024

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный технический университет».

Почтовый адрес: 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84.

Тел.: 8(473)246-66-47

Электронный адрес: [tte.kaf@cchgeu.ru](mailto:tte.kaf@cchgeu.ru)

Подпись Винокурова А.А. заверяю

Проректор по науке и инновац



Башкиров А.В.