

ОТЗЫВ

официального оппонента Крупкиной Татьяны Юрьевны
на диссертацию МАКСИМЕНКО ЮРИЯ НИКОЛАЕВИЧА «Мощные
полупроводниковые приборы со статической индукцией»,
представленную к защите на соискание ученой степени доктора технических
наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и
наноэлектроники, квантовых устройств.

Актуальность темы:

В настоящее время половина всей мировой энергетики потребляется в виде электрической энергии, и силовая электроника играет ключевую роль в ее цикле производства – хранения – распределения. Мощные полупроводниковые ключи находят широкое применение во многих областях силовой электроники, являются важными элементами радиоэлектронной аппаратуры. Отдельный класс мощных высоковольтных полевых транзисторов – транзисторы со статической индукцией (СИТ). СИТ обладают целым рядом достоинств, таких как высокие пробивные напряжения, хорошие усилительные свойства, малые искажения выходного сигнала и др. Реализация в полной мере возможностей СИТ, за счет создания новых конструкций мощных высоковольтных транзисторов и тиристоров, позволит создать элементную базу, отвечающую актуальным потребностям современной силовой электроники. В этой связи, работа Максименко Ю. Н., посвященная созданию мощных полупроводниковых приборов со статической индукцией, обладающих уникальными ключевыми характеристиками, безусловно, является актуальной и имеет большое практическое значение для отечественной электронной отрасли.

К основным научным результатам следует отнести:

1. Разработаны физико-математические модели для анализа структуры приборов со статической индукцией с использованием ПО Sentaurus TCAD для расчета статических и динамических ВАХ.
2. На основе проведенных теоретических исследований, разработаны следующие конструкции:

- транзистор со статической индукцией (СИТ), у которого исключена паразитная область затвора, что позволило увеличить рабочую частоту более чем на порядок;

- СИТ с быстродействующим диодом;
- конструкция составного транзистора со статической индукцией;
- СИТ защитными стабилитронами на входе и на выходе;
- прибор с N-образной характеристикой для защиты РЭУ от перегрузок по току.

3. Предложена новая технологическая схема формирования структуры кристалла приборов со статической индукцией, обеспечивающая процент выхода годных по кристаллу в 3-4 раза выше, чем для технологической схемы, которая применялась ранее при выпуске серийных приборов на всех предприятиях, выпускающих приборы данного класса;

4. Разработана новая конструкция приборов со статической индукцией, у которой область истока заменена на гетеропереход, что приводит к существенному снижению сопротивления канала в открытом состоянии и повышению максимальной рабочей частоты.

5. Предложены новые конструкции тиристоров со статической индукцией с планарным катодом на Si и GaAs, которые существенно превосходят известные тиристоры по основным электрическим параметрам;

6. Разработаны схемы управления приборами со статической индукцией с нормально открытым каналом для УМ и ВИЭП, которые не требуют дополнительного источника, запирающего силовой прибор перед запуском основной схемы РЭУ.

К безусловным достоинствам работы следует отнести **практическую значимость** полученных Максименко Ю.Н. научных результатов, позволивших провести разработку конструкций и технологических методов формирования транзисторов со статической индукцией с высоким (80-90%) выходом годных приборов. Результаты работ, выполненных Ю.Н. Максименко, были внедрены в серийное производство на предприятиях г. Новосибирска (ХК ПАО «НЭВЗ-

Союз»), г. Махачкалы (ООО «Эльдаг»), и др., что подтверждено соответствующими актами внедрения.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Научные результаты получены на основе:

- фундаментальной положений теории физических механизмов работы полевых транзисторов с управляющим р-п переходом;
- физико-химических основ полупроводниковой технологии;
- теории и методов измерений электрофизических и электрических параметров полупроводниковых структур и приборов.

На этом основании считаю научные результаты и выводы диссертации обоснованными.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных соискателем результатов подтверждается тем, что на основе проведенных соискателем исследований разработаны конструкции и технологии создания СИТ и тиристоров, которые позволили наладить промышленное массовое производство приборов со статической индукцией на полупроводниковых заводах в таких городах, как Новосибирск, Александров, Брянск, Махачкала, Винница. Эффективность разработанных технологий изготовления приборов подтверждается результатами измерений их параметров и характеристик. Важно, что новизна и приоритет предложенных автором конструктивно-технологических решений защищены 14 авторскими свидетельствами и патентами на изобретения СССР и РФ.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов

В диссертационной работе впервые получены следующие результаты:

1. Разработаны физико-математические модели для приборов со статической индукцией, работающих в биполярном и полевом режимах, позволяющие проводить быстрый инженерный расчет основных электрических параметров приборов с планарным затвором для статического и динамического режимов работы, а также оптимизировать конструкцию кристалла.

2. Исследованы конструкции транзисторов со статической индукцией и тиристоров с электростатическим управлением (ТЭУ) и разработаны новые с более высокими электрическими характеристиками: повышено быстродействие более чем на порядок, увеличен коэффициент усиления по току в 2-3 раза.

3. Разработаны конструкции новых приборов: прибор с N-образной характеристикой, СИТ с антипараллельным быстродействующим диодом на одном кристалле, конструкция составного СИТ, конструкция СИТ и ТЭУ с гетероисточником и гетерокатодом, конструкция и технология ТЭУ с полевым управлением.

4. Разработаны оригинальные схемы управления приборов со статической индукцией с нормально открытым каналом для усилителей мощности звуковых частот и вторичных источников электропитания.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации:

Использование разработанных физико-математических моделей при проектировании новых конструкций приборов со статической индукцией, что существенно сократит сроки выполнения ОКР. Освоение в серийном производстве разработанных новых приборов со статической индукцией внесет значительный вклад для выхода отечественной силовой электроники на новый уровень.

Анализ содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 124 наименования, и трех приложений, в т.ч. двух актов внедрения результатов диссертации в серийное производство ХК ПАО «НЭВЗ-Союз» (г. Новосибирск), ООО «Эльдаг» (г. Махачкала). Общий объем работы составляет 210 страниц, включая 105 рисунка и 8 таблиц. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 25 научных работах, защищены 14-тью авторскими свидетельствами и патентами на изобретения СССР и РФ.

В целом диссертационная работа представляет результаты авторского выполнения исчерпывающего объема исследований и разработок, включающего постановку задач, разработку промышленных технологий и внедрение в серийное

производство разработанной на основе этих технологий серии полупроводниковых приборов со статической индукцией.

Во введении обоснована актуальность работы. Сформулированы цели и задачи, решаемые в диссертации. Отмечены научная и практическая ценность результатов работы, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ принципов действия, основных характеристик и конструкций приборов со статической индукцией. Приведены примеры существующих физико-математических моделей СИТ для полевого режима работы, указаны их недостатки. Проведен сравнительный анализ и отмечены достоинства СИТ по сравнению с биполярными и МОП-транзисторами на Si, SiC, GaN и IGBT.

Во второй главе представлены результаты разработки конструктивно-технологических методов создания мощных высоковольтных приборов со статической индукцией с планарной структурой затвора.

Третья глава посвящена описанию и сравнительному анализу разработанных соискателем конструкций мощных полупроводниковых приборов со статической индукцией. Проведена оценка преимуществ каждой конструкции, описаны области их применения.

В четвертой главе рассмотрены вопросы создания и применения тиристоров с электростатическим управлением.

Пятая глава включает результаты разработки физико-математической модели приборов со статической индукцией, выполненной с использованием САПР Sentaurus TCAD. Разработанная модель наглядно демонстрирует преимущества приборно-технологического моделирования, позволяя исследовать влияние конструктивно-технологических параметров структуры на основные статические и динамические характеристики прибора, его высокочастотные параметры. Результаты исследования открыли новые возможности для улучшения конструкций СИТ, позволили разработать новую конструкцию СИТ с улучшенным на порядок быстродействием.

В шестой главе рассмотрены особенности применения разработанных в 1980-1990 годы мощных высоковольтных транзисторов со статической индукцией

с планарным затвором и нормально-открытым каналом. Показаны преимущества использования СИТ в таких устройствах, как усилители мощности и вторичные источники электропитания.

В заключении собраны общие результаты работы и выводы.

В приложениях приведены акты внедрения результатов диссертационной работы в серийное производство, а также авторские свидетельства и патенты СССР и РФ по теме диссертации.

Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации и достаточно полно отражает основные результаты и выводы диссертации, выполненной на высоком научно-техническом уровне.

К недостаткам диссертационной работы следует отнести:

1. В первой главе в разделе, посвященном физико-математическим моделям транзисторов со статической индукцией (раздел 1.6), достаточно много внимания уделено аналитическим методам расчета параметров СИТ. Соответствующие модели детально изложены на стр. 42-59, при этом имеется ряд погрешностей описания, затрудняющих оценку представленного материала. Так, определены не все параметры представленных уравнений, например, N_G в выражениях (1.20), (1.21), (1.22), N_g в (1.29), N_d в (1.34), I_A , I_B на стр. 47 и др. Приведенное уравнение (1.22) вызывает серьезные возражения, учитывая размерность входящих в него величин. На рис. 1.24 отсутствует точка согласования, ссылка на которую дана в тексте (стр. 45).

2. Наряду с объемным описанием в первой главе аналитических моделей, не достаточно убедительным представляется однозначный вывод автора о том, что «не представляют интереса» (стр.60) примеры использования программных средств SPICE и программы технологического моделирования SUPREM3 для моделирования СИТ, приведенные другими авторами в работах [80-82], учитывая плодотворное применение самим автором программных средств приборно-технологического моделирования для исследования параметров и совершенствования конструкции СИТ, чему посвящена пятая глава диссертационной работы.

3. Приведенное в разделе 1.7. сравнение параметров транзистора со статической индукцией с биполярными и МОП-транзисторами на Si, SiC, GaN и

IGBT необходимо было бы, на мой взгляд, дополнить иллюстративным материалом, позволяющим провести количественное сравнение параметров рассматриваемых транзисторов и более строго определить границы эффективного применения СИТ.

4. Не достаточно обоснованными (или базирующимися на устаревшей информации) представляются сделанные выводы автором о современном уровне микроэлектронной технологии в РФ (стр. 67), об отсутствии в РФ технологий GaN и SiC (стр.118).

5. К сожалению, в работе отсутствуют экспериментальные данные, относящиеся к характеристикам предложенных автором конструкций тиристоров со статической индукцией, приведенных в главе четыре.

6. В работе имеются стилистические погрешности и опечатки, некоторые из которых способны ввести читателя в заблуждение. Например, область рабочих напряжений до 1500 кВ на стр. 65 и др.

Заключение

Оценивая диссертацию Максименко Ю.Н. в целом, следует заключить, что отмеченные недостатки не ставят под сомнение основные результаты, выводы и защищаемые положения и не снижают ценности диссертационной работы и ее практической значимости. Диссертационная работа Максименко Юрия Николаевича на соискание ученой степени доктора технических наук представляет собой цельную, завершенную во всех аспектах научно-исследовательскую работу, содержащую решение актуальной проблемы по созданию мощных полупроводниковых приборов со статической индукцией, превосходящих по основным параметрам известные на настоящий момент времени силовые полупроводниковые приборы. Это дает основу новому направлению развития техники и технологий создания и промышленного внедрения современных отечественных силовых полупроводниковых приборов и вносит значительный вклад для выхода отечественной силовой электроники на новый уровень.

Диссертация полностью соответствует всем требованиям к докторским диссертациям, установленным в пунктах 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденном Постановлением Правительства РФ № 842 от

24.09.2013г. (в действующей редакции), а ее автор Максименко Юрий Николаевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.2. Электронная компонентная база микро - и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Отзыв составила **Крупкина Татьяна Юрьевна**, доктор технических наук, профессор, профессор Института интегральной электроники имени академика К.А. Валиева федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (г. Москва), адрес: 124498, г. Москва, г. Зеленоград, площадь Шокина, 1, тел. +7-985-920-74-58, e-mail: krupkina@miee.ru

Официальный оп

Т.Ю. Крупкина

28.03.2025г.

Личную подпись

Генеральный секретарь

А. В. Корнев

Поступил в совет 02.04.2025
Одобрено 02.04.2025