

На правах рукописи

Ю. Максименко

Максименко Юрий Николаевич

Мощные полупроводниковые приборы со статической индукцией

Специальность 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и
наноэлектроники, квантовых устройств

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена в Холдинговой компании Публичном акционерном обществе «Новосибирский электровакуумный завод – Союз»

Научный консультант: Троян Павел Ефимович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (г. Томск), кафедра физической электроники, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

Наумова Ольга Викторовна, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск), лаборатория технологии кремниевой микроэлектроники, заведующая лабораторией;

Коханенко Андрей Павлович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» (г. Томск), кафедра квантовой электроники и фотоники, профессор кафедры;

Крупкина Татьяна Юрьевна, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (г. Москва), кафедра интегральной электроники и микросистем, профессор кафедры.

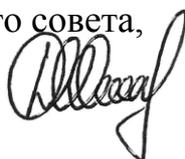
Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Пульсар» (г. Москва).

Защита диссертации состоится «23» мая 2025 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, корпус I, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru

Автореферат разослан «__» февраля 2025 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент



Дмитрий Иванович Остертак

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность диссертационной работы и степень разработанности темы исследования. Мощные полупроводниковые ключи (МПК) являются важными элементами радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), существенно влияющими на показатели надежности и массогабаритные параметры. Наиболее широкое применение они нашли во вторичных источниках электропитания (ВИЭП) с бестрансформаторным входом, в выходных каскадах усилителей мощности (УМ), модуляторах, схемах управления электродвигателями, системах генерирования летательных аппаратов, космической аппаратуре и солнечной энергетике. Наиболее массовое применение МПК нашли в области электронной автомобильной промышленности. Долгое время основным прибором, применяемым в этих областях, являлся биполярный транзистор (БТ). Однако из-за низкой перегрузочной способности, связанной с явлением вторичного пробоя, низкого коэффициента усиления по току, невысокого быстродействия приборов с повышенным (более 100 В) рабочим напряжением они перестали удовлетворять современным требованиям, предъявляемым к разработчикам РЭА.

Появление в конце 1970-х годов нового класса приборов – мощных полевых МДП-транзисторов резко ослабило конкурентоспособность БТ. Высокая их перегрузочная способность и быстродействие открыли новые возможности при построении РЭА.

Однако, наряду с достоинствами, МДП-транзисторы имеют существенный недостаток – высокое сопротивление канала в открытом состоянии. Долгое время этот недостаток сдерживал быстрое развитие МДП-приборов, и лишь появление в 1980-х годах ряда новых конструктивно-технологических решений позволило начать их серийное производство и послужило началом бурного вытеснения биполярных транзисторов полевыми. Был организован промышленный выпуск мощных транзисторов с диапазоном максимально допустимых напряжений от 50 до 1500 В.

Несмотря на достигнутые успехи, мощные МДП-транзисторы, особенно высоковольтные, уступали по сопротивлению канала в открытом состоянии биполярным из-за монополярного механизма токопереноса. В связи с этим шел постоянный поиск новых конструктивно-технологических решений, которые бы позволили сочетать одновременно достоинства полевых и биполярных транзисторов. Так, в начале 1990-х годов появились приборы, известные под аббревиатурой COMFET, IGT, GEMFET, VIFET, имеющие высокие допустимые напряжения (до 1–2 кВ), большой выходной ток, высокое быстродействие, малые потери во включенном состоянии и высокую

перегрузочную способность. Основная идея в этих конструкциях заключается в том, что снижение сопротивления канала в полевом транзисторе достигается за счет модуляции проводимости в канале неосновными носителями. К сожалению, свыше 1,5–2 кВ применение этих приборов не эффективно, так как для повышения максимального напряжения необходимо увеличивать толщину низкоомной базы приборов, а это приводит к резкому увеличению сопротивления канала и снижению быстродействия.

Появление в начале 2000-х годов БТ с полевым управлением и подложкой кристалла, имеющей другой тип проводимости, чем база прибора, позволило решить эту проблему. Эти приборы, названные IGBT, получили широкое развитие и массово выпускаются в настоящее время.

В конце 1970-х – начале 1980-х годов появился новый класс мощных высоковольтных полевых транзисторов – транзисторов со статической индукцией (СИТ).

К основным достоинствам СИТ можно отнести следующее:

1. Возможность получения высоких пробивных напряжений порядка нескольких киловольт.
2. Большую крутизну и высокие значения коэффициента блокирования, т.е. хорошие усилительные свойства.
3. Малые искажения выходного сигнала, что очень важно при формировании импульсов тока с короткими фронтами.
4. Возможность перевода транзистора в биполярный режим работы и тем самым обеспечение очень низких остаточных напряжений, ниже чем у биполярных транзисторов, так как на пути протекания тока отсутствуют р-п-переходы.
5. Очень высокое быстродействие, так как удаление большей части неосновных носителей из канала происходит путем вытягивания полем в затвор, а оставшаяся – рекомбинирует с электронами, летящими из истока.
6. Более высокую устойчивость к спецвоздействию и статическому напряжению.

Разработкой мощных высоковольтных СИТ и тиристорных с электростатическим управлением (ТЭУ) активно занимались в 1980-е годы японские фирмы Tohin и Mitsubishi, которые разработали серию транзисторов (2SK76, 2SK77, 2SK180, 2SK181, 2SK182, 2SK183), способных переключать мощности в сотни киловатт с временем переключения 300 нс. Изобретателем этих приборов является японский профессор И. Нишизава (I. Nishizawa). Все приборы данной серии имеют структуру кристалла со скрытым затвором. Это снижает их быстродействие и ограничивает возможность эффективного снижения сопротивления канала при прямом смещении управляющего

перехода, что не позволяет реализовать все возможности этого класса приборов.

В 1980-е годы в ОКБ при Новосибирском электровакуумном заводе (ОКБ при НЭВЗ) автором данного исследования была разработана технология по созданию мощных высоковольтных СИТ с планарным затвором. Создана целая серия приборов с рабочим напряжением от 50 до 1200 В и токами до 30 А с нормально открытым и нормально закрытым каналами. В 1990 году завод НЭВЗ посетил профессор И. Нишизава. Он ознакомился с разработками и серийным производством СИТ и заявил, что разработчики на НЭВЗ существенно его опередили по созданию данных приборов и он больше ими заниматься не будет. Действительно, после 1990 года в литературе нет работ И. Нишизавы по приборам со статической индукцией.

В 1992 году после объединения трех новосибирских электронных заводов в НПО «Адрон» направление силовой электроники на НЭВЗ было остановлено в связи с приоритетным расширением производства схем памяти. В 1993 году состоялись переговоры с Александровским заводом полупроводниковых приборов им. 50-летия СССР (АЗПП, Владимирская обл., РФ) о передаче им серийно выпускаемых на НЭВЗ СИТ. С 1994 года по 2010 год разработка приборов со статической индукцией осуществлялась только на АЗПП, а затем на полупроводниковых заводах Брянска, Махачкалы, Ульяновска, а также Ташкента и Винницы. Ввиду того, что разработчиками во вновь создаваемых приборах были использованы иные конструктивные решения путем изменения переданных базовых конструкций, такие приборы обнаруживали пониженное быстродействие и, как следствие, не смогли конкурировать с IGBT – приборами и даже с БТ.

В середине 2010 годов автор по результатам анализа накопленной информации о развитии транзисторной тематики в мире и опыту отечественного производства МПК пришел к выводу о перспективности и возможностях развития приборов со статической индукцией на новом уровне конструктивно-технологических возможностей, исходя из новых потребностей и, в том числе, расширения номенклатуры типов приборов на полностью отечественных технологиях. В последние десятилетия за рубежом появился новый класс высоковольтных ключевых приборов – приборов на широкозонных материалах SiC и GaN. Они существенно превосходят по основным параметрам и кремниевые полевые МДП -транзисторы, и IGBT, но по быстродействию и сопротивлению канала в открытом состоянии уступают СИТ.

Актуальность данной работы обусловлена развитием и техническим прогрессом электротехники и электроэнергетики, что потребовало создания

элементной базы с более высокими электрическими характеристиками, в частности мощных высоковольтных транзисторов и тиристоров. В настоящее время наиболее совершенными мощными высоковольтными транзистором и тиристором являются СИТ и ТЭУ с планарной структурой затвора, поэтому разработка этих приборов с более низкой себестоимостью и улучшенными ключевыми характеристиками выступает важной народно-хозяйственной задачей.

Цель работы. На базе разработанных в 1980-х годах технологии, конструкции СИТ-приборов и освоения их в серийном производстве автором в 1988 году была защищена кандидатская диссертация. Однако применение транзисторов КП802 и КП926 в качестве ключа показало, что наряду с их огромными достоинствами есть и недостатки: при работе прибора в биполярно-полевом режиме, при выключении приборов появлялась задержка выключения, которая могла составлять до 1,5 мкс (в зависимости от уровня импульса управления). Разобраться в ее причинах с помощью математического аппарата, разработанного в кандидатской диссертации, не представлялось возможным, так как он показывал только качественную зависимость ВАХ от конструктивных и электрофизических параметров прибора.

Цель диссертационной работы – проведение анализа влияния на работу приборов со статической индукцией в статическом и динамическом режимах конструктивных и электрофизических параметров с помощью разработанных физико-математических моделей. Разработка на базе данного анализа новых конструкций приборов со статической индукцией с более высокими характеристиками, а также принципиально новых приборов, позволяющих создавать на их основе более эффективную и надежную РЭА.

Для достижения поставленной цели **решались следующие основные задачи:**

- разработка физико-математических моделей, позволяющих осуществлять инженерный расчет основных электрических параметров СИТ и ТЭУ с планарной структурой затвора в статическом и динамическом режимах работы в полевом и биполярном режимах;

- с помощью разработанных моделей проведение анализа влияния конструктивных и электрофизических параметров на ВАХ и создание приборов с оптимальными конструктивными параметрами, имеющих значительно лучшие основные электрические характеристики;

- поиск новых конструктивно-технологических решений, позволяющих создавать мощные высоковольтные приборы со статической индукцией, такие как СИТ и ТЭУ с быстродействующим диодом на одном кристалле, составные

приборы, прибор с N-образной характеристикой для защиты РЭА от перегрузок по току, СИТ и ТЭУ с гетероистокком и гетерокатодом.

Объектом исследования служат транзисторы и тиристоры со статической индукцией, а также принципиально новые приборы, работающие на принципе статической индукции: прибор с N-образной характеристикой (дефензор), СИТ с быстродействующим диодом, составные СИТ, СИТ с защитными стабилитронами на входе и на выходе; СИТ и ТЭУ с гетероистокком и гетерокатодом.

Предметом исследования служат технология и конструкция СИТ и ТЭУ, а также конструкции новых приборов, работающих на принципе статической индукции.

Научная новизна. 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 СИТ и 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 гетероистокком 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.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Физико-математические модели, позволяющие проводить [1, 2]:

- быстрый инженерный расчет и прогнозирование основных электрических параметров приборов СИТ, БСИТ и ТЭУ для статического и динамического режимов работы;
- оптимизацию конструкции кристалла приборов.

2. Технологический базовый маршрут формирования структуры кристалла приборов со статической индукцией с планарным затвором, обеспечивающий выход годных по кристаллу не менее 80-90% [3].

3. Конструкции СИТ и БСИТ приборов с увеличенной частотой генерации (более, чем на порядок) [4].

4. Семейство новые конструкций приборов со статической индукцией:

- СИТ и БСИТ с антипараллельным быстродействующим диодом, выполненных на одном кристалле [5]:

- с диодом, расположенным под площадкой истока,

- с диодом, распределенным по активной структуре кристалла;

- составной СИТ-СИТ [6];

- прибор с N-образной вольт-амперной характеристикой [7];

- конструкция СИТ и БСИТ, защищенных на входе и на выходе с быстродействующими стабилитронами [8].

5. Конструкции СИТ и ТЭУ с геттероистоком и гетерокатодом [9, 10].

6. Схемы управления СИТ с нормально открытым каналом без дополнительного источника смещения [9].

Теоретическая и практическая значимость результатов работы:

- разработан технологический метод формирования структуры кристалла, который позволяет создать транзисторы со статической индукцией с нормально открытым и нормально закрытым каналами (БСИТ) с выходом годных по кристаллу приборов 80-90%;

- разработан мощный высоковольтный транзистор со статической индукцией – КП942А-5 с антипараллельным скоростным диодом;

- разработаны и исследованы экспериментальные образцы прибора с N-образной ВАХ, составные транзисторы и транзисторы, защищенные на входе и на выходе быстродействующими стабилитронами;

- разработаны конструкции СИТ и ТЭУ с более высокими скоростями переключения;

- разработаны конструкции СИТ и ТЭУ с геттероистоком и гетерокатодом;

- предложены принципы управления приборами с нормально открытым каналом.

Применение приборов со статической индукцией в РЭА позволяет значительно снизить массогабаритные параметры, повысить КПД устройств, упростить схемы управления, повысить надежность работы и снизить себестоимость. Представленные физико-математические модели позволяют использовать компьютерное моделирование для оптимизации конструкций, сократить затраты и сроки разработок данного класса приборов.

Результаты работы внедрены на предприятиях г. Новосибирска («НЭВЗ-Союз», ГП «Октава»), Бердска (БРЗ), Москвы (Г-4147, Г-4148), Александрова

(АО «Александровский завод „Элекс”»), Махачкалы (ООО «Эльдаг»), Ташкента (ЗПП), Томска (НПО «Полюс») и др.

Результаты работы были использованы при выполнении научного проекта «Теоретические исследования и экспериментальная разработка оптической приставки для анализа параметров компонентов высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи аналогового и цифрового сигналов» в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроник (Минобрнауки России, соглашение № FEWM-2024-0004 от 17.01.2024 г.).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Результаты исследований, представленные в диссертации, соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств:

Пункт 1 – «Разработка и исследование физических основ создания новых и совершенствования существующих приборов, интегральных схем, изделий микро- и нанoeлектроники, твердотельной электроники, дискретных радиоэлектронных компонентов, микроэлектромеханических систем, нанoeлектромеханических систем, квантовых устройств, включая оптоэлектронные приборы и преобразователи физических величин»:

- разработаны и исследованы физико-технические принципы совершенствования мощных высоковольтных приборов со статической индукцией с планарной структурой затвора; разработаны и изготовлены принципиально новые приборы со статической индукцией: составные транзисторы; транзистор с антипараллельным быстродействующим диодом на одном кристалле; прибор с N-образной характеристикой; прибор, защищенный по входу и по выходу быстродействующими стабилитронами; транзистор и тиристор с гетероистоком и гетерокатодом;

- разработан, исследован и реализован технологический способ формирования структуры кристаллов приборов со статической индукцией, обеспечивающий увеличение процента выхода годных по кристаллу в 3–4 раза выше технологической схемы, которая применялась ранее при выпуске серийных приборов.

Пункт 2 – «Исследование и разработка физических и математических моделей изделий по п. 1, в том числе для систем автоматизированного проектирования»:

- разработаны физико-математические модели для расчета и анализа основных ВАХ приборов со статической индукцией для статического и динамического режимов;

- разработана эквивалентная схема замещения приборов со статической индукцией для быстрой оценки высокочастотных свойств.

Достоверность полученных результатов подтверждается методологией исследования, основанной на классических подходах к анализу данных по физике работы полупроводниковых приборов. Исследование электрических параметров образцов СИТ проводилось с помощью высокочастотных измерительных средств. В частности, измерение ВАХ СИТ проводилась на панорамном приборе Л2-56.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы в последние годы были доложены на VIII Российском форуме «Микроэлектроника-2022» (г. Сочи); IX Российском форуме «Микроэлектроника-2023» (г. Сочи); международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (г. Севастополь, 2022 г.); международном промышленном форуме «Интеллект машин и механизмов» (г. Москва, 2022 г.); саммите дизайн-центров электроники (г. Москва, май 2023 г.); конференции «Фундаментальные и прикладные аспекты развития современной науки» (г. Уфа, январь 2023 г.), а также на других всероссийских и международных научных мероприятиях.

Личный вклад автора. Автору принадлежат инициативы в выборе целей и направлений работ, постановке задач и подходов к их решению, в личной разработке технологических методов формирования структуры СИТ, БСИТ, ТЭУ, а также теоретическом обосновании и расчете конструкций всех разработанных под его руководством полупроводниковых приборов, в анализе и систематизации данных литературы и экспериментальных результатов исследований по теме диссертации.

Все приведенные в диссертации результаты получены автором или при его непосредственном участии и руководстве. В статьях, посвященных моделям, автор принимал участие в постановке задачи при построении моделей СИТ, обсуждении результатов и написании статей, остальные статьи написаны автором. Все изобретения предложены и описаны автором.

Автор был научным руководителем и главным конструктором 18 НИОКР по исследованиям, разработкам технологий, конструкций и внедрению в серийное производство СИТ и БСИТ.

Автором предложены конструкции новых приборов со статической индукцией и под его руководством изготовлены опытные образцы:

- составные транзисторы СИТ-СИТ и СИТ-БСИТ;
- СИТ и БСИТ с быстродайствующим диодом, выполненные на одном кристалле;

- прибор с N-образной характеристикой – дефензор, защищающий радиоэлектронные устройства от перегрузок по току;
- СИТ и БСИТ с защитой на входе и на выходе быстродействующими стабилитронами;
- новая конструкция транзистора КП926, у которой эффективная емкость и сопротивление канала снижены более чем на порядок.

По идеям автора предложена конструкция СИТ с гетероистоком, которая обеспечивает снижение сопротивление канала на два порядка и повышение быстродействия более чем на порядок.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 25 печатных работ в научных изданиях, из них работ, опубликованных согласно перечню российских рецензируемых научных журналов по специальности 2.2.2, в которых опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора наук – 10. По теме диссертации получено 14 авторских свидетельств и патентов на изобретения в СССР и РФ. Издана монография [М1]. Получены акты внедрения результатов диссертации.

Результаты исследований автора и их внедрения в разработки СИТ и БСИТ изложены в 40 научно-технических отчетах по НИОКР.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 124 наименований и 3 приложений (14 авторских свидетельств и патентов РФ). Общий объем работы составляет 210 страниц, включая 105 рисунков и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована ее цель, указаны основные задачи, новизна полученных результатов, практическая значимость и изложены защищаемые положения.

В первой главе «Физические и конструктивно-технологические аспекты приборов со статической индукцией» представлены результаты анализа литературных данных развития приборов со статической индукцией. Показано, что долгое время за рубежом высоковольтные приборы со статической индукцией создавались на базе полупроводниковой структуры со скрытым затвором. Однако из-за сложности технологических процессов, приводящих к снижению сопротивления затвора, эти приборы имеют относительно низкое быстродействие. Времена переключения транзисторов с рабочим напряжением 800 В составляют не менее 300 нс.

Быстродействующие транзисторы со статической индукцией, в том числе и СВЧ транзисторы, изготавливались на базе структуры с планарным

затвором, но известные методы формирования структур с планарным затвором позволяют создавать низковольтные приборы с рабочим напряжением порядка 100 -150 В с относительно небольшой площадью кристалла (~0,25 мм²).

Одной из главных причин, ограничивающей повышение рабочего напряжения приборов с планарным затвором, состоит в том, что известные методы не позволяют решить противоречивую конструкторско-технологическую проблему: повышение пробивного напряжения участка затвор-исток при высоких значениях коэффициента блокирования.

Из литературного обзора становится понятно, что до настоящего времени отсутствуют адекватные физико-математические модели, позволяющие производить инженерный расчет основных электрических параметров приборов со статической индукцией, таких как коэффициент блокирования, коэффициент усиления по напряжению, сопротивления канала в открытом состоянии, время включения и выключения.

В первой главе приведен сравнительный анализ транзисторов со статической индукцией с биполярными, МОП-полевыми транзисторами, выполненными на Si, SiC, GaN и IGBT. Показано, что основными достоинствами транзисторов со статической индукцией по сравнению с данными приборами являются:

1. Отрицательный температурный коэффициент тока стока, что позволяет исключить развитие явления вторичного пробоя приборов и, соответственно, создавать сильноточные сборки путем параллельного соединения большого количества кристаллов (даже для биполярного режима работы).
2. Отсутствие явления прокола между областями истока и стока и, соответственно, получение высоких пробивных напряжений (порядка нескольких кВ).
3. Высокий входной и малый выходной импедансы.
4. Высокие переключающие характеристики (описаны приборы с рабочей частотой 1 ГГц и выходной мощностью 100 Вт).
5. Большая крутизна и весьма высокие значения коэффициента блокирования, т.е. хорошие усилительные свойства.
6. Весьма низкие шумы и малые искажения входного сигнала.

Надо полагать, что это еще далеко не полный перечень достоинств СИТ, так как в литературе практически не освещены такие вопросы, как устойчивость СИТ к спецвоздействию; возможность работы СИТ в биполярном режиме, когда сопротивление канала в открытом состоянии значительно понижается; недостаточно полно освещены вопросы работы СИТ в ключевом режиме и т.д.

Во второй главе «Разработка конструктивно-технологических методов создания мощных высоковольтных приборов со статической индукцией с планарной структурой затвора» показано, что основная технологическая проблема создания мощных высоковольтных приборов со статической индукцией с планарной структурой затвора состоит в том, что с одной стороны необходимо обеспечить узкий канал, а с другой стороны обеспечить достаточно большое расстояние между истоком и управляющим р-п переходом при глубоком его залегании. Максимально допустимое рабочее напряжение связано с коэффициентом блокирования и максимально допустимым напряжением затвор-исток соотношением вида:

$$U_{\text{си макс}} = \mu^* \cdot U_{\text{зи макс}} \quad (1)$$

При современном уровне технологии проведения диффузионных процессов и процессов фотолитографии реализовать известными методами необходимые конструктивные параметры такого класса приборов в условиях серийного производства практически невозможно. Это связано с тем, что для повышения рабочего напряжения приборов до величины в несколько сотен вольт при сохранении оптимального сочетания других его электрических параметров, глубина залегания управляющего р-п-перехода должна быть не менее 3-4 мкм при ширине канала 3–5 мкм.

Для обеспечения необходимой величины напряжения пробоя между затвором и истоком расстояние между границами р⁺-области затвора и п⁺-области истока $\lambda_{\text{зи}}$ должно иметь величину не менее 1 мкм. Современными известными технологическими методами сформировать п⁺-область истока в области канала такого транзистора с данными электрическими параметрами не представляется возможным даже при использовании приемов самосовмещения.

В 1980-х годах технология изготовления мощных транзисторов позволяла обеспечить минимальную ширину истока в серийном производстве не менее 3 мкм с точностью $\pm 0,9$ мкм и глубину залегания управляющего перехода с точностью $\pm 10\%$. Очевидно, что при данных технологических разбросах исключить смыкание областей истока и затвора возможно только при большой ширине канала, примерно равной 8 мкм. Это резко снижает усилительные свойства прибора, напряжение $U_{\text{си}}$ и, соответственно, процент выхода годных по кристаллу приборов. Поскольку коэффициент блокирования падает с увеличением ширины канала по закону, близкому к квадратичному, а напряжение пробоя затвор-исток растет по линейному закону, то путь увеличения ширины канала принципиально не позволяет решить проблему создания высоковольтных приборов.

Другой существенный недостаток известных методов создания СИТ состоит в следующем. Стремление повысить $U_{\text{си макс}}$ за счет увеличения μ^* путем роста глубины залегания р-п перехода R приводит к росту отклонения от номинального значения рабочего напряжения $U_{\text{си макс}}$. Несложно показать, что отношение:

$$\frac{U_{\text{си макс}}}{U} \approx \left[1 \pm \sigma \frac{R}{\frac{L_{\text{и}}}{2} + \lambda_{\text{зи}}} \right]^2, \quad (2)$$

где U — оптимальное значение рабочего напряжения при заданном R , $L_{\text{и}}$ — ширина истока, σ — относительная величина разброса R , уменьшается с увеличением R .

При $R = 4$ мкм, $L_{\text{и}} = 3$ мкм, $\lambda_{\text{зи}} = 1$ мкм и $\sigma = 0,1$ рабочее напряжение может отклониться в сторону уменьшения на 60%, что приведет к снижению процента выхода годных приборов.

Из этого следует, что известными технологическими методами изготовить высоковольтный прибор с электростатическим управлением с планарным затвором в условиях серийного производства практически невозможно.

Для решения этой проблемы были разработаны три новых технологических метода формирования структуры кристалла СИТ, которые подробно были рассмотрены в кандидатской диссертации автора.

Первый из них метод LOCOS с подзатвором Si под маской Si_3N_4 . Он позволил создавать приборы с $U_{\text{си макс}}$ до 1500 В, который и был использован при разработке серии мощных высоковольтных приборов со статической индукцией. Однако, опыт производства этих приборов показал, процент выхода годных по кристаллу с размерами более 30 мм² не выше 30%, что делает эти приборы гораздо дороже обычных БТ и МОП приборов, поэтому они нашли широкое применение в тех областях, где цена не была определяющей.

В 2022 году, вернувшись к разработкам приборов со статической индукцией, автор данной работы, проанализировав технологию, которая была использована при производстве серийных приборов, определил ее недостатки и нашел решения как их устранить. Предложенный новый технологический метод формирования структуры кристалла позволяет обеспечить выход годных более 80% [3].

В третьей главе «Мощные полупроводниковые приборы со статической индукцией» представлен новый класс приборов, работающих на принципе статической индукции, которые были изобретены в середине 90-х годов прошлого века, получены и обследованы экспериментальные образцы,

но большинство из них не были разработаны из-за развала электронных предприятий г. Новосибирска.

Составной СИТ

Одним из представителей этого класса приборов является составной транзистор. В 1990-е годы прошлого столетия было разработано несколько вариантов конструкций составных транзисторов на основе СИТ [6, А1-А5]. Достоинством составных СИТ является высокий коэффициент усиления по току при сохранении высокого быстродействия.

Основным достоинством составного транзистора СИТ-СИТ состоит в том, что СИТ 1 и СИТ 2 выполнены настолько близко один к другому, что ОПЗ затвора входного СИТ 1 при распространении взаимодействует с ОПЗ затвора выходного СИТ 2. При достижении ОПЗ затворной области СИТ 2 на ней устанавливается потенциал меньше приложенного к клемме 3 по абсолютной величине на величину ΔU , определяемую соотношением:

$$\Delta U = L^2 \frac{\lambda^2 \cdot q \cdot N_D}{2\epsilon\epsilon_0}, \quad (3)$$

где L — расстояние между крайними областями затворов входного и выходного транзисторов, N_D — концентрация носителей заряда в высокоомном слое, q — заряд электронов, ϵ — диэлектрическая проницаемость полупроводника, ϵ_0 — диэлектрическая постоянная.

При дальнейшем увеличении отрицательного напряжения обрывается токовая цепь сток-исток СИТ 1 — затвор СИТ 2 — исток СИТ 2, так как на р-п переход затвор-исток СИТ 2 подается обратное напряжение, и СИТ 1 запирается. С этого момента начинается запирающее действие выходного транзистора. При достижении отрицательного напряжения $U_{\text{зап}}$ происходит отсечка тока стока выходного СИТ 2, и составной транзистор запирается. Для того чтобы обеспечить запирающее действие транзисторов, величина отрицательного напряжения $U_{\text{зап}}$ должна удовлетворять требованию:

$$|U_{\text{зи отс2}}| < |U_{\text{зап}} - \Delta U| < |U_{\text{зи2 макс}}|, \quad (4)$$

где $U_{\text{зи отс2}}$ — напряжение отсечки выходного транзистора, $U_{\text{зи2 макс}}$ — максимально допустимое напряжение затвор-исток выходного транзистора, ΔU — разность потенциалов между затворными областями входного и выходного транзисторов.

Положительный эффект по быстродействию достигается тем, что в устройстве выходным транзистором является СИТ, затворная область которого располагается в зоне действия ОПЗ затворной области входного

транзистора. Время выключения СИТ определяется временем дрейфового движения основных носителей в канале. При выключении транзистора время снижается за счет того, что отсутствует рассасывание неосновных носителей. Быстродействие составного транзистора не хуже, чем быстродействие одного СИТ, так как разряд емкости затвор-исток ($C_{зи}$) выходного транзистора осуществляется через затворную область входного. Опытные образцы данных приборов были изготовлены и обследованы.

СИТ и БСИТ с быстродействующим диодом

Следующим новым прибором, работающим на принципе статической индукции, являются СИТ и БСИТ с быстродействующим диодом выполненных на одном кристалле [5].

В составе структуры кристалла транзистора со статической индукцией формируется дополнительная область, выполняющая функцию антипараллельного диода и по параметрам предельного тока, напряжения и быстродействия соответствующая транзистору, в структуре которого он формируется.

Такая транзисторно-диодная структура выглядит следующим образом. В известном высоковольтном полевом переключающем транзисторе с вертикальным каналом с управляющим р-п-переходом в высокоомной области первого типа проводимости формируют дополнительные сильнолегированные области второго типа проводимости, которые отделены от области затвора высокоомным слоем первого типа проводимости. Дополнительные области расположены от области затвора на таком расстоянии, при котором еще не происходит преждевременный лавинный пробой управляющего р-п-перехода между истоком и затвором, и не менее расстояния, при котором смыкаются области пространственного заряда, возникающие вокруг сильнолегированных областей второго типа проводимости в высокоомном слое первого типа проводимости при подаче напряжения не менее максимально допустимого напряжения затвор-исток. Дополнительные области одной с затвором типом проводимости соединены с областями истока общей металлизацией.

При смыкании области пространственного заряда затвора с областью пространственного заряда дополнительных областей дальнейшее повышение напряжения на затворе вызывает протекание тока по цепи «затвор — дополнительные области — исток» (характеристика прибора ограничителя напряжения — стабилитрона). Работает предложенный прибор следующим образом. При подаче на затвор транзистора прямого смещения последний открывается, в область канала впрыскиваются неосновные носители, которые модулируют низкоомную область стока (модулируют сопротивление низкоомной области стока). Для закрытия транзистора на затвор подается

- диод размещен в активной части кристалла.

Прибор с конструкцией по первому варианту был разработан (КП937А-5) и освоен в серийном производстве. Поскольку диффузионная длина дырок в кремнии составляет около 600 мкм (в зависимости от качества кремния может быть и более 1 мм), то понятно, почему диод выключается быстро (центральная область диода находится от затвора на расстоянии 300 мкм).

По второму варианту изготовлены опытные образцы у которых диод встраивался в активную часть кристалла через четыре истока. Во втором варианте расстояние между областями распределенного диода составляет 91,6 мкм, поэтому накопленные неосновные носители при прямом включении диода участвуют в процессе включения транзистора, что приводит к повышению его быстродействия, а неосновные носители включенного транзистора ускоряют включения диода, когда на нем возникает инверсное напряжение. Исследование экспериментальных образцов это подтвердило.

СИТ с защитными стабилитронами на входе и выходе

В настоящее время для защиты радиоэлектронных устройств от перегрузок по напряжению используются стабилитроны. Они выпускаются во всех развитых странах мира в больших количествах. Однако гарантированно защитить силовые ключи они не могут, так как соединительные выводы дают индуктивную задержку их включения, а принцип работы на лавинном пробое делает прибор потенциально ненадежным.

Решить проблему по защите ключа удалось следующим образом [8].

В высоковольтном полевом переключающем транзисторе с вертикальным каналом с управляющим р-п-переходом (СИТ с триодной характеристикой) в высокоомной области первого типа проводимости формируются дополнительные сильнолегированные области второго типа проводимости, которые отделены от области затвора высокоомным слоем первого типа проводимости и расположены от области затвора на расстоянии не более того, при котором происходит преждевременный лавинный пробой управляющего р-п перехода между истоком и затвором, и не менее расстояния, при котором смыкаются области пространственного заряда, возникающие вокруг сильнолегированных областей второго типа проводимости в высокоомном слое первого типа проводимости при подаче напряжения не менее максимально допустимого напряжения затвор-исток. В предлагаемом приборе дополнительные области расположены от затвора на расстоянии, при котором область пространственного заряда затвора смыкается с областью пространственного заряда дополнительной областью при напряжении на

затворе, которое запирает напряжение на транзисторе больше рабочего и меньше максимально допустимого. Дополнительная область соединяется с областями истоков металлизацией.

Ниже приведена эквивалентная схема прибора (рис. 2).

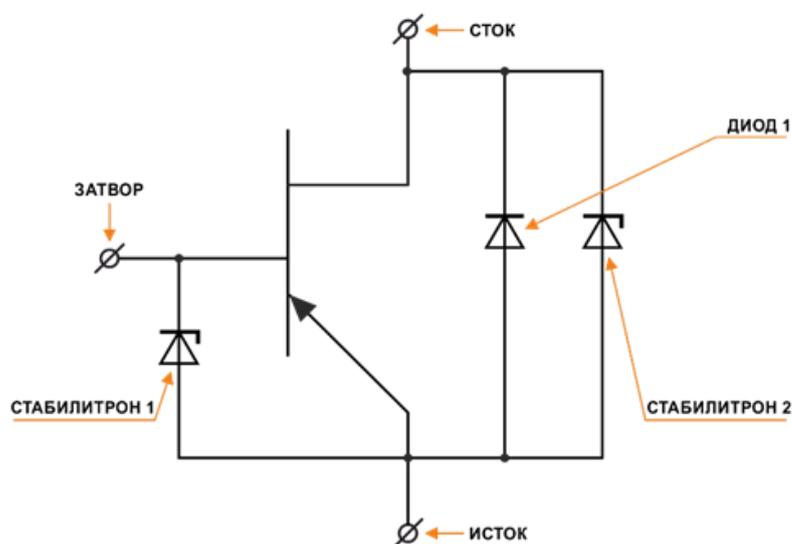


Рисунок 2 - Эквивалентная схема прибора

Кристалл прибора выполнен на низкоомной полупроводниковой подложке первого типа проводимости с высокоомным слоем того же типа проводимости, которые выполняют роль стока. Диффузионная область затвора второго типа проводимости выполнена в виде ячеистой структуры с окнами, в которых расположены сильнолегированные области истоков первого типа проводимости.

Между чередующимися структурами транзистора сформированы дополнительные диффузионные сильнолегированные области второго типа проводимости, которые отделены от области затвора высокоомной областью первого типа проводимости и расположены от него на расстоянии a . Металлизация кристалла включает металлизацию истока и затвора. Металлизация истока является одновременно металлизацией дополнительных областей. На рис. 3. приведены ВАХ СИТ с защитными стабилитронами.

Дополнительные области необходимо располагать от затвора на таком расстоянии, при котором области пространственного заряда, образующегося вокруг затвора в высокоомном слое стока, смыкаются с областями пространственного заряда дополнительных областей при напряжении на затворе, равном напряжению запирающего стабилизирующего напряжения. При уменьшении этой величины уменьшается U стабилизации и в какой-то момент может стать меньше U рабочего.

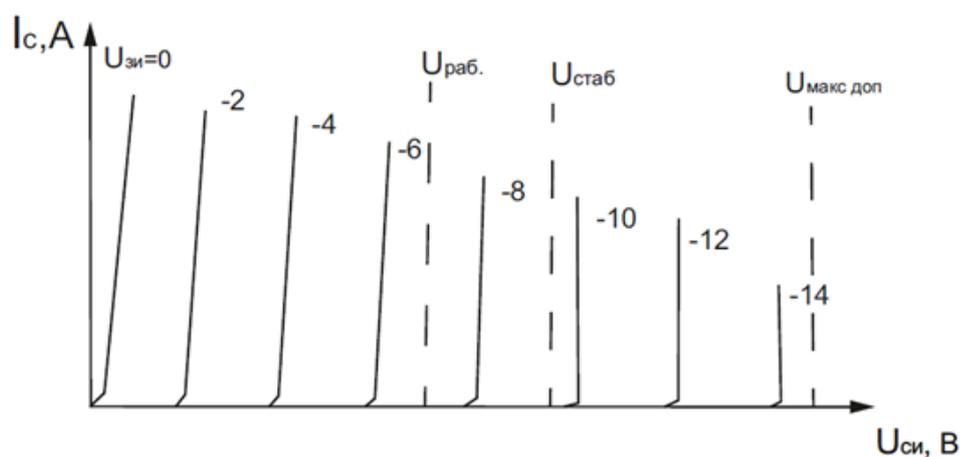


Рисунок 3 - ВАХ СИТ с защитными стабилитронами

При ее увеличение увеличивается U стабилизации и в какой-то момент может стать больше U максимально допустимого. В первом случае перестает работать прибор, а во втором — стабилитрон.

Работает предложенный прибор следующим образом. На затвор транзистора подается прямое смещение, и транзистор находится в открытом состоянии. При подаче на затвор запирающего напряжения, когда ОПЗ затвора и дополнительной области смыкаются, открывается стабилитрон, и через него начинает протекать ток. Величина его задается схемой управления. На затворе постоянно будет запирающее напряжение, равное напряжению запираения U стабилизации.

При появлении на транзисторе инверсного напряжения открывается диод Д1, а при скачке напряжения на стоке больше U рабочего открывается стабилитрон. Таким образом, транзистор полностью защищен. Причем и стабилитроны, и диод работают со скоростью транзистора, что повышает надежность всего ключа.

Прибора с N-образной характеристикой

В настоящее время для защиты радиоэлектронных устройств от перегрузок по напряжению используются стабилитроны. Однако быстродействующего дискретного элемента, защищающего радиоэлектронные устройства по току с малым сопротивлением, нет.

Разработчики радиоэлектронных устройств защиту от перегрузок по току решают схемотехническими приемами. Но часто схемотехническое решение не успевает защитить электронные устройства из-за низкого быстродействия.

Создание прибора с N-образной характеристикой — дефензора (от англ. defense — защита) — значительно упрощает защиту радиоэлектронных

устройств от перегрузок по току и значительно повышает их надежность [7, П1].

Кристалл прибора изготавливается следующим образом.

В известном высоковольтном полевом переключающем транзисторе с вертикальным каналом с управляющим р-n переходом в высокоомной области первого типа проводимости формируют дополнительные сильнолегированные области второго типа проводимости, которые отделены от области затвора высокоомным слоем первого типа проводимости. Дополнительные области расположены от области затвора на расстоянии не более того, при котором происходит преждевременный лавинный пробой управляющего р-n перехода между истоком и затвором, и не менее расстояния, при котором смыкаются области пространственного заряда, возникающие вокруг сильнолегированных областей второго типа проводимости в высокоомном слое первого типа проводимости при подаче напряжения не менее максимально допустимого напряжения затвор-исток.

Дополнительная область является вторым управляющим электродом. Эквивалентная схема прибора приведена на рис. 4.

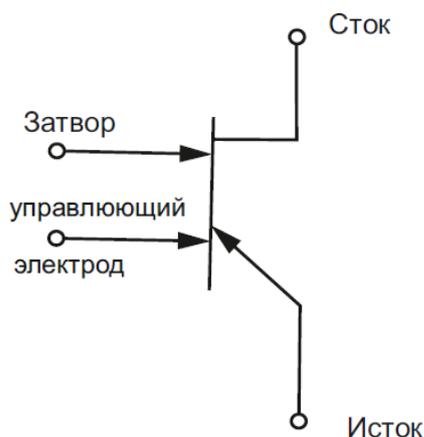


Рисунок 4 - Эквивалентная схема дефензора

Кристалл прибора выполнен на низкоомной полупроводниковой подложке первого типа проводимости с высокоомным слоем того же типа проводимости, которые выполняют роль стока. Диффузионная область затвора второго типа проводимости выполнена в виде ячеистой структуры с окнами, в которых расположены сильно легированные области истоков первого типа проводимости.

На краю кристалла транзистора сформирована дополнительная диффузионная сильнолегированная область второго типа проводимости, которая отделена от области затвора высокоомной областью первого типа

проводимости. Металлизация кристалла включает металлизацию истока, затвора и металлизацию дополнительного управляющего электрода.

Дополнительную область необходимо располагать от затвора на расстоянии, не превышающем величины распространения области пространственного заряда, образующегося вокруг затвора в высокоомном слое стока, при котором происходит лавинный пробой. Величина распространения области пространственного заряда зависит от величины прикладываемого к р-п переходу обратного напряжения. По краю управляющего р-п перехода за счет его искривления, а также наличия на поверхности кристаллов зарядов, которые повышают в приповерхностном слое концентрацию примеси, лавинный пробой в области пространственного заряда наступает значительно раньше, чем в объеме или на краю кристалла, где применяются специальные меры для предотвращения преждевременного пробоя. Для того чтобы внутри кристалла не наступал преждевременный лавинный пробой, область пространственного заряда, распространяемая от затвора, до момента наступления поверхностного лавинного пробоя должна сомкнуться с областью пространственного заряда дополнительной области.

С другой стороны, дополнительная область должна располагаться от затвора на расстоянии не ближе того, при котором смыкаются области пространственного заряда, возникающие вокруг сильнолегированных областей второго типа проводимости в высокоомном слое первого типа проводимости при подаче напряжения не менее максимально допустимого напряжения затвор-исток.

При смыкании области пространственного заряда затвора с областью пространственного заряда дополнительных областей дальнейшее повышение напряжения на затворе вызывает протекание тока по цепи «затвор — дополнительные области — исток» (характеристика прибора ограничителя напряжения — стабилитрона).

Работает предложенный прибор следующим образом.

На затвор транзистора подается прямое смещение, и транзистор находится в открытом состоянии. На дополнительный управляющий электрод подается запирающий потенциал. Величина потенциала должна быть такой, что при заданном токе стока (токе защиты) сложение потенциалов на стоке и на дополнительном управляющем электроде должно обеспечивать смыкание области пространственного заряда затвора и области пространственного заряда дополнительного электрода. Когда области пространственных зарядов смыкаются, потенциал с дополнительного электрода переходит на затвор, и транзистор запирается. Дальнейшее повышение напряжения на стоке

приводит к снижению тока стока. При этом скорость выключения транзистора сохраняется такой же высокой.

Ниже на рис. 5 приведена ВАХ предлагаемого прибора. Такую характеристику называют N-образной.

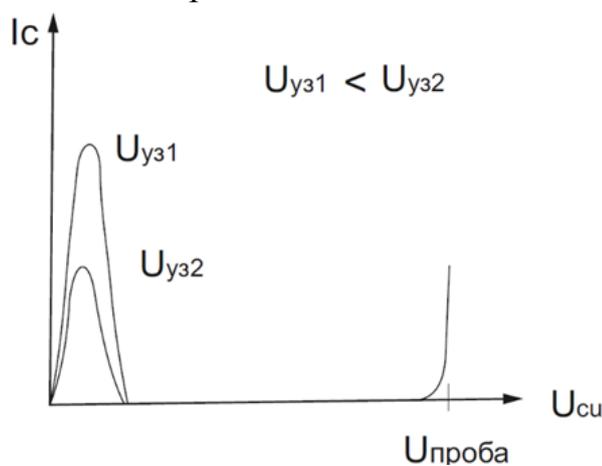


Рисунок 5 - ВАХ дефензора

В четвертой главе «Тиристор с электростатическим управлением» представлены две принципиально новые конструкции тиристоров с электростатическим управлением [М1].

Транзисторы со статической индукцией с планарным затвором с доработанной конструкцией способны работать на частотах до 10 мГц при рабочих напряжениях 500–1200 В [4]. В этом диапазоне рабочих напряжений они имеют очень низкое сопротивление канала и высокое быстродействие. Дальнейшее повышение рабочего напряжения требует увеличения ширины высокоомной области стока. Это приводит к существенному росту сопротивления канала и снижению быстродействия, так как модуляция канала неосновными носителями — дырками из затвора — из-за их низкой подвижности на большую глубину происходит медленно и неэффективно. Поэтому при рабочих напряжениях выше 1500 В наиболее эффективно применять тиристоры.

Тиристор — это прибор, у которого низкоомная подложка имеет p^+ - область. В открытом состоянии прибора из подложки в канал впрыскиваются неосновные носители и эффективно модулируют его. Так как в канале тянущее поле, то они заполняют канал гораздо быстрее, чем из затвора. Тиристоры с электростатическим управлением имеют преимущества перед биполярными тиристорами и приборами IGBT, так как на пути протекания тока имеют один p - n переход, а не три, соответственно, падение напряжения на них в открытом состоянии меньше. Также они более скоростные, потому что удаление неосновных носителей происходит через затвор.

В 2020 году фирма Gree наладила производство серийных МОП-транзисторов на карбиде кремния (SiC), которые из-за широкозонности материала показывают рекордные значения по R_k и максимальному рабочему напряжению и могли бы составить конкуренцию ТЭУ. Однако из-за низкой подвижности электронов ($900 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, а в канале и того меньше — $200\text{--}300 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$, у Si — $1450 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$), они могут работать на частоте не выше 150 кГц. Кроме того, они имеют такие недостатки, как высокую себестоимость (SiC по твердости не уступает алмазу и имеет высокую дефектность кристаллической решетки), низкую спецстойкость, высокую вероятность включения паразитного диода и сложность в управлении.

Первый тиристор с электростатическим управлением был изобретен И. Нишизавай в 1975 году. Он, как и первые СИТ, имел заглубленный затвор. Заглубленный затвор имеет недостаток — большое сопротивление. Это ограничивает высокочастотные свойства прибора. В 1982 году Й. Накамура предложил конструкцию ТЭУ с планарным затвором, свободную от этого недостатка. Однако обе эти конструкции обладают еще одним негативным свойством: у них в открытом состоянии инжекция неосновных носителей из области затвора происходит по всей площади затвора и на периферии. При выключении тиристора неосновные носители в канале выводятся гораздо быстрее, чем на периферии и под площадками катода и затвора, как и у транзистора. Это приводит к затягиванию выключения и ограничивает быстродействие.

Предложенная новая конструкция ТЭУ, свободная от этого недостатка [M1]. Для исключения «паразитной» инжекции дырок из затвора под площадками катода, затвора и периферийных областей последние отключаются от области затвора высокоомной n^- -областью стока, как у доработанного транзистора [4].

Для исключения «паразитной» инжекции дырок из анода, между n^- и p^+ областями анода в местах под площадками и на периферии формируется стопорный слой n^+ . Этот слой не дает в этих местах инжекции дырок.

Время переключения тиристора зависит от величины эффективной емкости затвора ($C_{\text{вх эф}}$), которая определяется уравнением:

$$C_{\text{вх эф}} = C_{\text{зи}} + C_{\text{зс}} (1 + M^*) + C_{\text{зк}} + C_{\text{зпл}}, \quad (5)$$

где M^* — коэффициент усиления, $C_{\text{зк}}$ — емкость, определяемая неосновными носителями в канале, $C_{\text{зпл}}$ — емкость, определяемая неосновными носителями под площадками и на периферии.

В линейном приближении:

$$T_{\text{пер}} = 2,2C_{\text{вх эф}} (R_{\Gamma} + R_3), \quad (6)$$

где R_{Γ} — выходное сопротивление генератора запускающих импульсов, R_3 — сопротивление области затвора тиристора.

Точный расчет $C_{з к}$ и $C_{з пл}$ не представляется возможным, но очевидно, что неосновные носители, определяющие их величину в канале и под площадками катода, затвора и на периферии, рассасываются по разным законам: в канале они вытягиваются полем и рекомбинируют с электронами, летящими из катода; под площадками и на периферии — медленно дрейфуют к затвору и аноду.

Ясно, что $C_{з пл}$ больше всех остальных, и ее устранение существенно повышает быстродействие тиристора. Кроме того, отключение «паразитных» областей уменьшит $C_{зи}$ и $C_{зс}$ почти в два раза. Сегодня ТЭУ с такой конструкцией еще не изготовлены, но ожидается, что при ее реализации уменьшение $T_{\text{пер}}$ будет более чем на порядок.

Конструкция ТЭУ является одной из лучших, выполненных на Si. Для ее реализации можно использовать хорошо отработанную технологию. Однако наиболее интересные конструкции ТЭУ будут на GaAs [M1], так как этот материал имеет подвижность электронов почти в восемь раз выше и более высокую ширину запрещенной зоны по сравнению с тиристорами, выполненными на Si. Это позволяет создавать более высоковольтные приборы и с более высокой скоростью переключения.

Предложена конструкция для создания ТЭУ на GaAs по технологии Trench на принципе максвелловского «сшивания» пограничных сред. На рис. 6 показан ее схематический разрез.

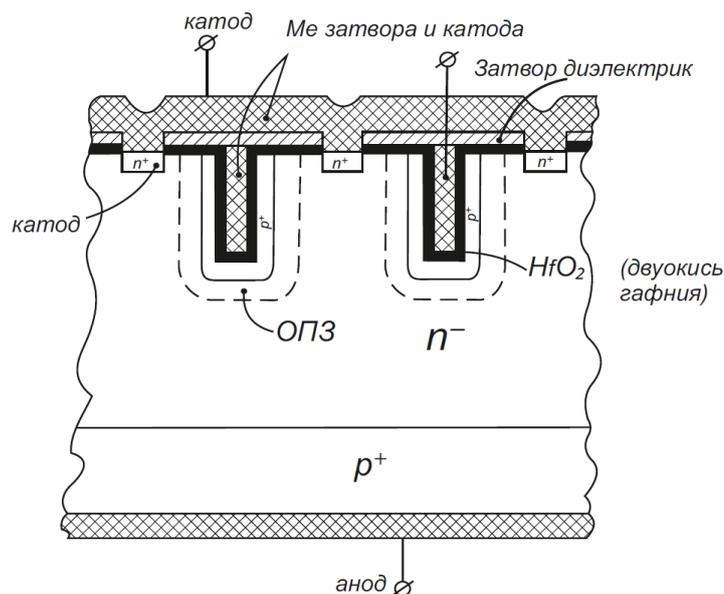


Рисунок 6 - Схемотехнический разрез кристалла ТЭУ с МОП полевым управлением

Тиристор представляет собой ТЭУ с МОП полевым управлением. Подзатворный окисел должен быть выполнен из диэлектрических материалов с высоким значением диэлектрической проницаемости $\epsilon_{ox} \gg \epsilon_{GaAs}$, т.е. из комбинаций окислов металлов, таких как Ti, Ta, Hf, Cd и др., с обязательным буферным нанослоем (<10 нм) широкозонного изолятора. Это не позволит переходить грань плотности поверхностных зарядовых состояний N_{ss} больше чем $3-5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$. В конструкции, приведенной рис. 6.4, применен диэлектрик из двуокиси гафния.

Из соотношения Максвелла:

$$\epsilon_1 \epsilon_0 E_1 = \epsilon_2 \epsilon_0 E_2 \quad (7)$$

следует, что соотношение выделяемого падения напряжения на p-n переходе и в оксиде гафния определяется, как:

$$U_{p-n} = (\epsilon_{HfO_2} \cdot U_{HfO_2} \cdot W_{p-n}) / (\epsilon_{Si} \cdot d_{HfO_2}); \quad (8)$$

$$K = U_{p-n} / U_{HfO_2} = (\epsilon_{HfO_2} \cdot W_{p-n}) / (\epsilon_{Si} \cdot d_{HfO_2}), \quad (9)$$

т.е. $K \approx$ от 200 ~ 250. Это говорит о том, что все приложенное напряжение к затвору будет переходить на p-n переход.

Плотность заряда инверсного канала несравнимо более высокая, чем в кремниевых JGT и карбид-кремниевых MOSFET, а подвижность электронов в канале, или, точнее говоря, дрейфовая скорость пролета электронов в i-GaAs-MOSFET в 20 раз превышает кремниевый дрейф и тем более карбид-кремниевую скорость пролета. Что же касается «проходных» и «выходных» RC-цепочек, то и здесь преимущество будет за GaAs вследствие того, что выходная емкость при нуле смещения как минимум в 30 и в 10 раз меньше, чем в SiC- и Si-MOSFET соответственно. Сопротивление открытого канала у GaAs-ТЭУ ($R_{dson\ GaAs}$) меньше, чем в $R_{dson\ SiC-MOSFET}$, так как идет мощная инжекция носителей из анода. Катод можно делать как n^+ -областью либо гетероинжекционным [M1].

Данный тиристор, вероятно, следует принимать во внимание в качестве абсолютного конкурента Si-IGBT-, SiC-MOSFET- и Si-MOSFET-транзисторам. Фактически, это новое семейство еще неизвестных на мировом рынке GaAs полевых тиристоров с изолированным затвором, которые можно будет обозначить следующим образом: гетероинжекционный полевой тиристор со статической индукцией, имеющий комбинированное гетеро-MOS/p-n-управление проводимостью канала, или HMOSJFET (где H — гетероинжекционный, MOS — МОП-затвор, J — p-n-затвор, FET — полевой

транзистор с управляющим p-n-переходом). В зависимости от параметров (толщины базы, концентрации свободных носителей) n^+ -AlGaAs-, n-GaAs-, InGaAs-, n^- -GaAs-слоев вольт-амперные характеристики нового тиристора будут или триодного, или пентодного типа, т.е. иметь либо нормально открытый канал, либо нормально закрытый. Входные емкости HMOSEFET-структур (эквивалент выходной мощности управляющего драйвера) практически на три порядка (в 1000 раз) меньше, чем входные $C_{зи}$ у SiC- или Si-MOSFET, чем и объясняется их быстродействие. Триодная структура GaAs полевого тиристора вследствие мощной электронной инжекции гетероизотипного истока (n^+ -AlGaAs / n-GaAs / i-GaAs) по плотности тока будет выше, чем Si-IGBT. По сути, триодная структура — электронный прототип Si-IGBT приборов с той лишь разницей, что частота коммутации таких тиристорov будет находиться в мегагерцевом диапазоне, а напряжение насыщения в несколько раз ниже.

Данную конструкцию ТЭУ можно выполнять и Si, используя объединение технологий Trench и технологии, которая используется при производстве СИТ. Себестоимость такого прибора гораздо ниже, чем GaAs, но по статическим и динамическим параметрам он будет превосходить Si-IGBT и SiC-MOSFET приборы.

В пятой главе «Физико-математические модели приборов со статической индукцией для биполярного режима работы» представлен теоретический анализ физических процессов в приборах со статической индукцией на базе разработанных моделей, устанавливающих связь конструктивных и электрофизических параметров структуры с ее электрическими характеристиками [1,2]. Построение физико-математических моделей полупроводниковых приборов является важной задачей, так как их наличие ускоряет процесс разработки прибора и дает более правильное понимание зависимости основных вольт-амперных характеристик (ВАХ) от конструктивных и электрофизических параметров структуры.

Разработке физико-математических моделей приборов со статической индукцией посвящено относительно небольшое количество работ. При этом в большинстве из них основное внимание уделено рассмотрению только стационарных процессов в полевом режиме работы прибора. Для разработки физико-математической модели, адекватно описывающей процессы токопереноса в структуре прибора, требуется математически сложный количественный анализ в простейшем случае двухмерной картины распределения электрического поля, потенциала и плотности тока в областях прибора, имеющих довольно сложную форму. Усугубляет трудность создания физико-математической модели приборов со статической индукцией и

нелинейная зависимость электрофизических параметров материала областей структуры от электрических режимов на электродах прибора. Это относится, в частности, к зависимости подвижности основных носителей заряда в канале структуры от напряженности электрического поля в нем.

В 1990 году был разработан высоковольтный транзистор со статической индукцией КП926 с планарным затвором, который был способен работать как в полевом, так и в биполярном режимах. Для расчета его ВАХ разработанные ранее физико-математические модели, неприменимы.

За последние два года автором данной работы проведено детальное исследование технологии и конструкции разработанного им транзистора КП926, который был первым СИТ прибором способный работать одновременно и полевом и в биполярном режимах. Предложен ряд решений, которые существенно улучшают основные характеристики этого прибора. Однако для более глубокого понимания влияния на основные характеристики прибора его конструктивных и электрофизических параметров нужна физико-математическая модель, так как экспериментальные исследования очень длительны по времени и требуют больших финансовых затрат.

В данной главе представлены физико-математические модели, позволяющие проводить расчет основных ВАХ приборов со статической индукцией для биполярного режима работы [1, 2]. Для анализа статических и динамических характеристик в качестве исходных данных использована структура кристалла транзистора КП926, который хорошо знаком РЭА.

Модель для расчета статических ВАХ выполнена в двухмерном представлении с применением Sentaurus TCAD. В Sentaurus TCAD при использовании двухмерного представления значение третьей координаты принимается равным 1 мкм и может быть увеличено заданием коэффициента площади (AreaFactor). Ниже на рис. 7 представлена моделируемая структура транзистора КП926.

Боковая диффузия принималась равной 0,8 от глубины залегания примеси. В данном случае коэффициент площади равен длине канала в микрометрах. В нашем случае AreaFactor для транзистора КП926 равен произведению длины одного элементарного канала на их количество ($242 \cdot 5100 = 1\,234\,200$ мкм).

При моделировании структуры КП926 использовались стандартные модели зависимости подвижности от концентрации примеси, Оже-рекомбинации и рекомбинации Шокли–Рида–Холла.

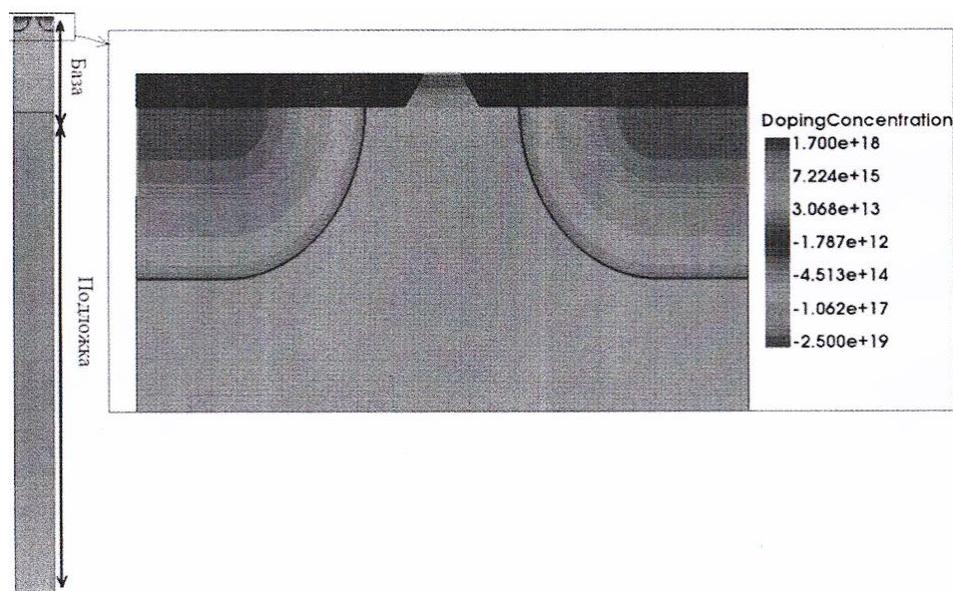


Рисунок 7 - Модель структуры КП926

Сравнение экспериментальных выходных характеристик с результатами моделирования представлены на рис. 8. Для сравнения были оцифрованы графики для токов затвора 150 мА, 400 мА, 800 мА. Отклонение результатов моделирования от эксперимента находится в пределах 20%.

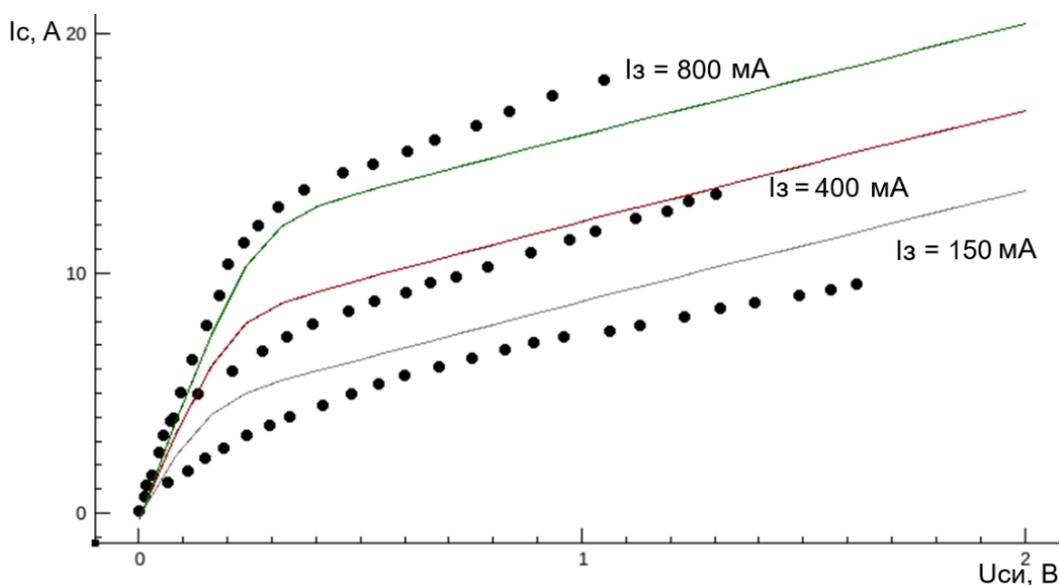


Рисунок 8 - Сравнение экспериментальных характеристик для токов затвора 150 мА, 400 мА, 800 мА с результатами моделирования. Точками обозначены данные оцифрованных графиков из рис. 2, линиями — результаты TCAD-моделирования

Моделирование структуры транзистора КП926 с использованием Sentaurus TCAD позволило более правильно понять влияние конструктивных

и электрофизических параметров структуры на основные электрические параметры прибора и сделать следующие выводы:

- оптимальная глубина залегания истока должна быть в пределах 1,0–1,1 мкм;
- концентрацию примесей в истоке и затворе желательно повысить до 10^{20} см³;
- толщина эпитаксиального слоя (базы) должна быть как можно меньше для заданного рабочего напряжения;
- концентрация примеси в подложке должна быть не менее 10^{17} см³, а ее толщина — как можно меньше (современные технологии позволяют делать толщину пластины менее 100 мкм).

Внедрение данных предложений позволит более чем в два раза увеличить коэффициент усиления по току и во столько же раз снизить сопротивление канала, соответственно, увеличатся быстродействие прибора и эффективность его работы (уменьшится мощность управления, статические и динамические потери).

Для анализа динамических характеристик СИТ при работе в биполярном-полевом режиме предложена эквивалентная схема замещения, приведенная на рис. 9.

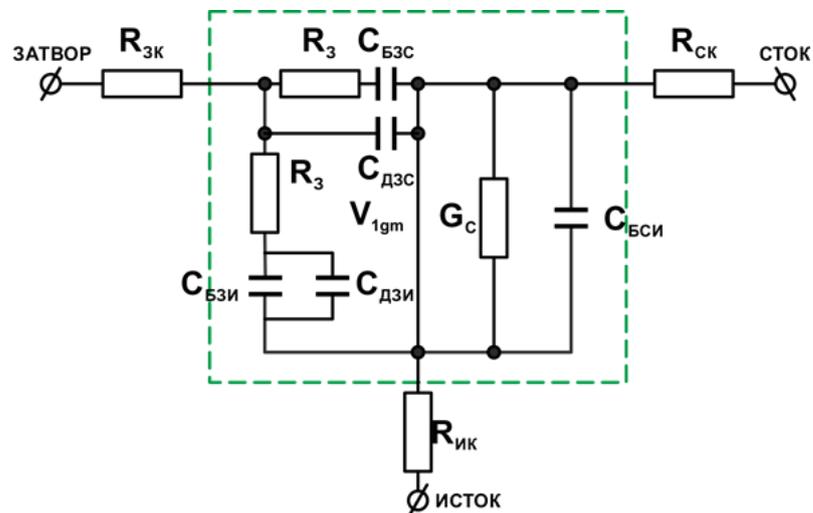


Рисунок 9 - Эквивалентная схема замещения СИТ для работы в биполярно-полевом режиме

Согласно эквивалентной схемы замещения, так как для транзистора КП926 $R_k \ll R_з \ll R_\Gamma$, максимальная частота генерации определяется выражением:

$$F_{\max} = \frac{g_m}{2\pi \cdot (C_{\text{БЗИ}} + C_{\text{БЗС}} + C_{\text{ДЗИ}} + C_{\text{ДЗС}})}, \quad (10)$$

где $C_{бзи}$ — барьерная емкость затвор-исток, $C_{бзс}$ — барьерная емкость затвор-сток, $C_{дзи}$ — диффузионная емкость затвор-исток, $C_{дзс}$ — диффузионная емкость затвор-сток, g_m — крутизна характеристики внутреннего транзистора, $R_з$ — сопротивление p^+ - области от металлизации затвора до середины истока, $R_{зк}$, $R_{ик}$, $R_{ск}$ — сопротивления выводов корпуса.

Как показывает расчет, для транзистора КП926 $C_{дзс}$ больше всех остальных емкостей на порядок. В новой конструкции КП926 она устранена, поэтому частота генерации у нее на порядок выше.

Для расчета емкостей прибора построена физико-математическая модель [2], которая позволила провести глубокий анализ влияния конструктивных и электрофизических параметров приборов на их быстроедействие и создать оптимальные их конструкции.

В шестой главе «Особенности применения транзисторов со статической индукцией» рассмотрены вопросы по управлению СИТ приборов с нормально открытым каналом. Разработаны схемы управления СИТ приборами с нормально открытым каналом для усилителей мощности звуковых частот (УМЗЧ) и вторичных источников электропитания (ВИЭП) без дополнительного запирающего источника электропитания [А10, А11]. Данные схемы были использованы в серийных изделиях РЭА. Показано, что нормально открытое состояние СИТ не вызывает ни каких неудобств при построении РЭА.

В заключении подведены основные итоги диссертационного исследования и сформулированы соответствующие выводы.

В приложениях А и Б представлены акты внедрения в серийное производство ХК ПАО «НЭВЗ-Союз» (г. Новосибирск) и ООО «Эльдаг» (г. Махачкала) результатов полученных в диссертации, в приложении С представлены авторские свидетельства и патенты СССР и РФ по теме диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработана новая физико-математическая модель структуры приборов со статической индукцией с использованием Sentaurus TCAD для расчета статических ВАХ, что позволило более правильно понять влияние конструктивных и электрофизических параметров структуры на основные электрические параметры прибора.
2. Разработана новая физико-математическая модель структуры приборов со статической индукцией для расчета динамических характеристик прибора, что позволило более точно понять особенности влияния

конструктивных и электрофизических параметров структуры на частотные свойства прибора.

3. Теоретические исследования влияния конструктивных и электрофизических параметров структуры на основные электрические параметры прибора позволили разработать новую конструкцию приборов со статической индукцией, у которой исключена паразитная область затвора, увеличен коэффициент усиления по току, что обеспечило увеличение максимальной рабочей частоты более чем на порядок.
4. Предложена новая технологическая схема формирования структуры кристалла приборов со статической индукцией, обеспечивающая процент выхода годных по кристаллу в 3-4 раза выше технологической схемы (80-90), которая применялась ранее при выпуске серийных приборов на всех предприятиях, выпускающих приборы данного класса.
5. Разработана новая конструкция приборов со статической индукцией, у которой n^+ область истока заменена на гетеропереход, что приводит к существенному снижению сопротивления канала в открытом состоянии и повышению максимальной рабочей частоты.
6. Предложена новая конструкция кристалла приборов, у которых отключенная от затвора паразитная область используется в качестве диода, защищающая транзистор от инверсного напряжения. Причем, скорость выключения диода соизмерима со скоростью транзистора.
7. Предложена новая конструкция составного транзистора, выполненного на одном кристалле, которая принципиально отличается от известных составных транзисторов: выключение выходного силового транзистора происходит через управляющий электрод входного транзистора, что обеспечивает высокую скорость выключения.
8. Предложена новая конструкция кристалла приборов, у которых отключенная от затвора паразитная область используется для размещения в ней защитных стабилитронов.
9. Предложена новая конструкция нового прибора – дефезора, который имеет ВАХ N-образного вида. Данный прибор может использоваться в качестве защитника РЭА от перегрузок по току.
10. Предложены новые конструкции тиристоров со статической индукцией с планарным катодом на Si и GaAs, которые существенно превосходят известные тиристоры по основным электрическим параметрам.
11. Предложена конструкция тиристоров со статической индукцией с планарным катодом на Si и GaAs у которых обычный катод и анод заменены на гетеропереходы, что приводит к уменьшению

сопротивления канала в открытом состоянии и повышает существенно их быстродействие.

12. Разработаны схемы управления приборами со статической индукцией с нормально открытым каналом для УМ и ВИЭП, которые не требуют дополнительный источник, запирающий силовой прибор перед запуском основной схемы РЭУ.

Совокупность выполненных научных исследований и предложенных конструктивно-технологических принципов и решений создания семейства мощных высоковольтных приборов со статической индукцией, превосходящих по основным параметрам известные на настоящий момент времени силовые полупроводниковые приборы, 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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях (журналах из перечня ВАК РФ по специальности 2.2.2), в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора наук:

1. Максименко Ю. Н., Петросянц К. О., Силкин Д. С. Грабежова В. К. // TCAD-Моделирование транзистора со статической индукцией // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2024. Т. 29. №4. С. 489-503.
2. Максименко Ю. Н., Петросянц К.О., Силкин Д. С., Грабежова В. К. // Высокочастотная модель транзистора со статической индукцией // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2024. Т. 29. №6. С. 772-786.
3. Максименко Ю. Н., Грабежова В. К. // Новая технологическая схема формирования структуры кристалла транзистора со статической индукцией КП926 // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Выпуск 2 (269) 2023. С. 54 – 60.
4. Максименко Ю. Н. // Транзистор со статической индукцией КП926 с повышенным быстродействием // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Выпуск 3 (266) 2022, с. 51-54.
5. Максименко Ю. Н. // Мощный высоковольтный транзистор со статической индукцией с антипараллельным диодом // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Выпуск 3 (266) 2022, с. 55-62.

6. Максименко Ю. Н. // Мощный составной транзистор со статической индукцией // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Выпуск 4 (267) 2022, с. 69-73.

7. Максименко Ю. Н. // Мощный полупроводниковый прибор с N-образной вольт-амперной характеристикой // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Выпуск 4 (267) 2022, с. 74-78.

8. Максименко Ю. Н., Грабежова В. К. // Полностью защищенный транзистор со статической индукцией // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Выпуск 1 (268) 2023. С. 24 – 30.

9. Максименко Ю. Н., Грабежова В. К. // Транзистор со статической индукцией с нормально закрытым каналом // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Выпуск № 4. 2023 г. С. 19 - 27.

10. Максименко Ю. Н., Грабежова В. К. // Можно ли сделать идеальный полупроводниковый ключ? // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. Выпуск 1 (268) 2023. С. 45 – 53.

Монография:

M1. Мощные полупроводниковые приборы со статической индукцией: монография // Ю.Н. Максименко. – Новосибирск: PVN, 2022. – 214 с.

Авторские свидетельства и патенты на изобретения:

A1. Полевой транзистор: авт. свидетельство от 21.08.1981 № 893097 / Максименко Ю.Н., Антонов М.И., Путинцев С.В.

A2. Способ изготовления полевых транзисторов с управляющим р-п переходом в вертикальном канале: авт. свидетельство от 01.11.1985 № 1215546 / Максименко Ю.Н., Корнилова С.Н., Жуковский Н.М.

A3. Усилитель мощности: авт. свидетельство от 15.07.1986 № 1270874 / Бессонов Г.К., Семенов Ю.Е., Максименко Ю.Н., Воронцов А.А.

A4. Способ изготовления полупроводниковых приборов со статической индукцией: авт. свидетельство от 22.07.1986 № 1272920 / Корнеев Е.В., Кучеренко К.В., Максименко Ю.Н.

A5. Составной высоковольтный переключающий транзистор: авт. свидетельство от 01.10.1987 № 1371471 / Данилов В.С., Максименко Ю.Н., Корнилова С.Н., Сергеев А.Г.

A6. Составной транзистор: авт. свидетельство от 15.09.1989 № 1538831 / Максименко Ю.Н., Криштафович И.А., Фелькер Г.А.

A7. Составной высоковольтный переключающий транзистор: авт. свидетельство от 22.12.1989 № 1559990 / Максименко Ю.Н., Данилов В.С., Бессонов Г.К.

А8. Мощный высоковольтный составной транзистор: авт. свидетельство от 15.08.1990 № 1614715 / Максименко Ю.Н., Макаров В.А., Агафонов С.М.

А9. Составной транзистор со статической индукцией: авт. свидетельство от 22.08.1990 № 1616449 / Максименко Ю.Н., Макаров В.А., Фелькер Г.А., Пальмихин М.Б.

А10. Устройство для управления силовым транзистором со статической индукцией: авт. свидетельство СССР № 1599951 / Мишин В.Н., Пчельников В.Н., Максименко Ю.Н., Кононов В.К., Фелькер Г.А. Заявл. 20.04.1988; опубл. 15.06.1990.

А11. Устройство для управления силовым транзистором со статической индукцией: авт. свидетельство СССР № 1599951 / Мишин В.Н., Пчельников В.Н., Максименко Ю.Н., Кононов В.К., Фелькер Г.А. Заявл. 20.04.1988; опубл. 15.06.1990.

П1. Заявка на патент РФ (изобретение) № 2022112569/28. Приоритет от 05.05.2022. Максименко Ю. Н., Глухов А. И., Романюк А. И. Днфензор
Решение о выдаче патента 10.11.2022.

П2. Патент РФ на изобретение номер № 2805777. Приоритет от 16.05.2023. Гордеев А. И., Войтович В. Е., Еремьянов О. Г., Максименко Ю. Н. Высоковольтный биполярный транзистор со статической индукцией. Решение о выдаче патента 24.10.2023.

П3. Патент РФ на изобретение № 2824888. Приоритет от 25.01.2023. Максименко Ю. Н., Грабежова В.К., Гордеев А.И. Высоковольтный полевой транзистор со статической индукцией и истоком из гетерперехода. Решение о выдаче патента 15.09.2024.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60x84 1/16. Объем 2,25 п.л. Тираж 120 экз.
Заказ № 130. Подписано в печать 17.02.2025 г.