



АО «НПП «ПУЛЬСАР»

105187, Москва, Окружной проезд,
Тел.: (495) 365-12-30; Факс: (495) 366
E-mail: administrator@pulsarnpp.
<http://pulsarnpp.ru>

На № _____ от _____
_____ № _____

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
АО «НПП «Пульсар»,
доктор технических наук, профессор

Владимирович Колковский

т. 2025

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

акционерного общества

**«Научно-производственное предприятие «Пульсар» (г. Москва)
на диссертационную работу Максименко Юрия Николаевича на тему:**

**«Мощные полупроводниковые приборы со статической индукцией»,
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 2.2.2 - Электронная компонентная база микро - и
нанoeлектроники, квантовых устройств.**

1.Актуальность темы исследования

Актуальность диссертационного исследования Максименко Юрия Николаевича, направленного на создание технологии мощных высоковольтных приборов со статической индукцией (СИТ) с нормально открытым и нормально закрытым каналами, а также новых конструктивных и технологических решений для разработки семейства мощных высоковольтных приборов со статической индукцией, обусловлены прогрессом и тенденцией развития силовой электроники, а также необходимостью создания элементной базы с более высокими электрическими характеристиками. Мощные полупроводниковые ключи (МПК) являются важными элементами радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), существенно влияющими на показатели их надежности и массогабаритные

параметры. Наиболее широкое применение они нашли во вторичных источниках электропитания (ВИЭП) в выходных каскадах усилителей мощности (УМ), модуляторах, схемах управления электродвигателями, системах генерирования летательных аппаратов, космической аппаратуре и солнечной энергетике. Массовое применение МПК нашли в 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 разработчиков РЭА. 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 на п/п материалах SiC и GaN. Однако по быстродействию и сопротивлению канала в открытом состоянии, а также по себестоимости, эти приборы уступают СИТ, разработанным в представленной работе.

2. Характеристика содержания работы

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 124 наименований и 3 приложений. Общий объем работы составляет 210 страниц, включая 105 рисунков и 8 таблиц.

Во введении даны общая характеристика работы, описание Проблемы, которую необходимо было решить, показана актуальность темы диссертационной работы, описана степень разработанности темы исследования, изложены цели работы, представлены её научная новизна и практическая значимость, методология исследований и разработок, степень достоверности, апробация полученных результатов и личный вклад автора,

реализация результатов исследований, положения, выносимые на защиту, соответствие диссертации Паспорту научной специальности.

В первой главе «Физические и конструктивно-технологические аспекты приборов со статической индукцией» представлены результаты литературных данных с анализом конструкции транзистора с управляющим р-n-переходом, отличающейся от ранее известных конструкций очень малым расстоянием между затвором и истоком, малыми размерами областей затвора, близких по форме к цилиндрическим, и очень низкой концентрацией примеси в канале. Проведен также анализ транзистора со статической индукцией на примере транзистора КП926, который является первым высоковольтным прибором со статической индукцией, способным работать как в полевом, так и в биполярном режимах. Когда на затвор подается положительный потенциал, ОПЗ р-n-перехода исчезает, в канал впрыскиваются неосновные носители (дырки) и в канале образуется электронно-дырочная плазма, которая резко снижает сопротивление канала из-за того, что концентрация основных носителей в эпитаксиальном слое увеличивается с $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ до $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (концентрации примеси в n^+ -истоке). Поэтому сопротивление канала у кристалла СИТ меньше, чем у мощных транзисторов на материалах SiC и GaN, на два порядка. Отрицательный температурный коэффициент тока стока СИТ транзистора позволяет параллельное сложение СИТ-транзисторов без развития явления вторичного пробоя приборов и, соответственно без опасения, что один прибор заберет на себя ток от других.

Во второй главе «Разработка конструктивно-технологических методов создания мощных высоковольтных приборов со статической индукцией с планарной структурой затвора» анализируется проблема создания мощных высоковольтных СИТ транзисторов с планарным затвором, когда, с одной стороны, необходимо обеспечить узкий канал, а с другой обеспечить достаточно большое расстояние между истоком и управляющим р-n-переходом. Параметрами оптимизации для достижения цели выбраны: обеспечение необходимой величины напряжения пробоя между затвором и

истоком, а также стабилизация и воспроизводство расстояния между границами p^+ области затвора и n^+ области истока ($\lambda_{зи}$), которое должно иметь величину не менее 1 мкм в условиях серийного производства. В части технологии: разработка LOCOS-технологии с процессом травления SiO_2 и Si под маской Si_3N_4 , формирование p^+ области затвора структуры СИТ в две стадии, формирование окон к истоку и затвору методом «жесткой» маски. В качестве перспективной технологии рассмотрена схема формирования структуры кристалла СИТ по принципу формирования затвора прямоугольной формы и ускоренной диффузии, что позволяет устранить разброс ширины канала, связанный с диффузией примеси на большую глубину и существенно стабилизировать такие параметры прибора, как напряжение отсечки, пробивное напряжение затвор-исток, сопротивление канала и крутизна характеристики. Одной из главных причин низкого процента выхода годных приборов СИТ при их серийном производстве являлась большая площадь кристалла, при размерах кристалла 6х6 мм и более велика вероятность попадания дефекта на кристалл. Одним из путей повышения надежности технологии, в качестве защиты истока от прожигания алюминием, предложено: после формирования истока, ввести дополнительную операцию нанесения «буферного» слоя, легированного поликремнием толщиной 0,5 мкм, после чего проводить металлизацию. Предложенный технологический маршрут формирования высоковольтной структуры кристалла прибора со статической индукцией с планарной конструкцией затвора позволяет создавать приборы с рабочим напряжением до 1500 В.

В третьей главе «Мощные полупроводниковые приборы со статической индукцией» представлен новый класс приборов, работающих на принципе статической индукции: составной СИТ, СИТ и БСИТ с быстродействующим диодом. Достоинством составных СИТ является высокий коэффициент усиления по току при сохранении высокого быстродействия. 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. Быстродействие составного транзистора не хуже, чем быстродействие одного СИТ, так как разряд емкости затвор-исток (Сзи) выходного транзистора осуществляется через затворную область входного.

Вертикальная структура канала приборов со статической индукцией позволяет использовать области, которые находятся под площадками истока и затвора, для других целей: формировать диод, защищающий силовой прибор от инверсного напряжения. Аналогичным образом изготавливаются СИТ с защитными стабилитронами на входе и выходе и прибор с N-образной ВАХ—дефензор (защита), что упрощает защиту радиоэлектронных устройств от перегрузок по току и значительно повышает их надежность;

- создавать в этих областях дополнительные транзисторы или схему управления силовым транзистором;
- формировать диод, защищающий силовой прибор от инверсного напряжения;
- формировать защитные стабилитроны;

В четвертой главе «Тиристор с электростатическим управлением» представлены две новые конструкции тиристоров с электростатическим управлением. 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. Предложена конструкция для создания ТЭУ на GaAs по технологии Trench и принципа максвелловского «сшивания» пограничных сред. Данную конструкцию ТЭУ можно выполнять и на 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 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. Моделирование структуры транзистора КП 926 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} см^{-3} ;
- толщина эпитаксиального слоя (базы) должна быть как можно меньше для заданного рабочего напряжения;
- концентрация примеси в подложке должна быть не менее 10^{17} см^{-3} , 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.

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. Данные схемы были использованы в серийных изделиях РЭА. Показано, что нормально

открытое состояние СИТ не вызывает никаких неудобств при построении РЭА.

3. Достоверность и научная новизна диссертации

Представленные в диссертации положения и результаты содержат значительные элементы научной новизны:

- разработка новой физико-математической модели 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 и оптимизировать его конструкцию;
- разработка базового технологического маршрута изготовления приборов со статической индукцией, обеспечивающего процент выхода годных по кристаллу до 80-90%, что более чем в 2 раза выше ранее выпускаемых серийных приборов на всех предприятиях, выпускающих приборы данного класса;
- предложение новой конструкции составного транзистора, выполненного на одном кристалле, при этом выключение выходного силового транзистора происходит через управляющий электрод входного транзистора, что обеспечивает высокую скорость выключения в том числе: СИТ и БСИТ с антипараллельными быстродействующими диодами, выполненными в активной структуре кристалла;
- предложение нового прибора с N образной ВАХ - (дефензора) для защиты РЭА от перегрузок по току;
- предложены конструкции СИТ и БСИТ, защищенные на входе и на выходе быстродействующими стабилитронами;
- предложены конструкции СИТ и ТЭУ с геттероистокком и гетерокатодом;
- разработана схема управления СИТ с нормально открытым каналом без дополнительного источника смещения.

Доказательность результатов и выводов, сформулированных в исследовании подтверждается тем, что по теме диссертации автором и коллективом под его руководством и с участием автора опубликовано 25 печатных работ (из них 10 работ, входящих в перечень ВАК по специальности 2.2.2), получено 14 авторских свидетельств и патентов на изобретения. Издана монография.

4. Значимость для науки и практики полученных результатов.

Разработан новый базовый технологический маршрут изготовления транзисторов со статической индукцией с нормально открытым и нормально закрытым каналами (БСИТ) с выходом годных по кристаллу приборов 80-90%;

Разработаны новые конструкции ряда приборов со статической индукцией:

- мощный высоковольтный транзистор КП942А-5 с антипараллельным скоростным диодом;
- образцы прибора с N – образной ВАХ, составные транзисторы и транзисторы, защищенные на входе и выходе быстродействующими стабилитронами;
- СИТ и ТЭУ с гетероистокком и гетерокатодом, а также с более высокими скоростями переключения.

Применение приборов со статической индукцией в РЭА позволяет значительно уменьшить их массогабаритные параметры, повысить надежность работы и снизить себестоимость. Результаты работы внедрены на предприятиях отрасли. Акты о внедрении результатов работы в диссертационной работе (Приложение А, Б).

5. Рекомендации по использованию результатов диссертации

Материалы диссертации Максименко Ю.Н. могут представлять интерес для широкого круга научно-технических и производственных предприятий, занимающихся разработкой или производственным выпуском новых радиоэлектронных устройств, в которые входят/могут входить мощные транзисторы, приборы КП-926, КП 942 А-5, СИТ и БСИТ с быстродействующими диодами, а также могут использоваться в учебных целях, при изучении курса «конструирование и технология дискретных полупроводниковых приборов».

6. Личный вклад автора

Автору принадлежат инициативы в выборе целей и направлений работы, 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. 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 быстродействующим диодом;
- прибор с N-образной ВАХ – дефензор, защищающий радиоэлектронные устройства от перегрузок по току;
- СИТ и БСИТ с защитой на входе и на выходе быстродействующими стабилитронами. Автор был научным руководителем и главным конструктором 18 НИОКР по исследованиям, разработкам технологий, конструкций и внедрению в серийное производство СИТ и БСИТ. Все изобретения предложены и описаны автором. По идеям автора предложена конструкция СИТ с гетероистоком, которая обеспечивает снижение

сопротивления канала на два порядка и повышение быстродействия более чем на порядок.

7. Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Результаты исследований, представленные в диссертации, соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности ВАК РФ 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 (МЭМС), нанoeлектромеханических систем (НЭМС), квантовых устройств, включая оптоэлектронные приборы и преобразователи физических величин»:

-разработаны и исследованы физико-технические принципы совершенствования мощных высоковольтных транзисторов со статической индукцией с планарной структурой затвора в статическом и динамическом режимах работы в полевом и биполярном режимах, а также путей снижения сопротивления канала в открытом состоянии и изготовлены принципиально новые приборы со статической индукцией: составные транзисторы, транзистор с антипараллельным быстродействующим диодом на одном кристалле, прибор с N-образной ВАХ;

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

Разработан, исследован и реализован базовый технологический процесс создания мощных высоковольтных приборов со статической индукцией с планарной структурой затвора, когда, с одной стороны, необходимо

обеспечить узкий канал, а с другой необходимую величину напряжения пробоя между затвором и истоком, а также расстояние между границами p^+ области затвора и n^+ области истока ($\lambda_{зи}$), которое должно иметь величину не менее 1 мкм, что позволило устранить разброс ширины канала, стабилизировать напряжение отсечки, пробивное напряжение затвор-исток и сопротивление канала.

Пункт 5 – «Исследование, проектирование и моделирование изделий, исследование их функциональных и эксплуатационных характеристик по п. 1, включая вопросы качества, долговечности, надежности и стойкости к внешним воздействующим факторам, а также вопросы их эффективного применения»:

Для повышения надежности технологии, в качестве защиты истока от прожигания алюминием, предложено: после формирования истока, ввести дополнительную операцию нанесения «буферного» слоя легированного поликремния толщиной 0,5 мкм, после чего проводить металлизацию.

8. Замечания по диссертационной работе

1. В гл.1 вывод стр. 64 «В 1980-е годы в ОКБ при НЭВЗ были найдены решения, которые позволили создавать приборы со статической индукцией с рабочим напряжением до 1500 кВ с планарной структурой затвора - неверен.

Ошибка, не кВ, а Вольт и рабочее напряжение 1500 В было достигнуто после 2020 г.

2. Не приведен базовый технологический маршрут и не указано какие из ниже приведенных технологических схем вошли в базовый маршрут

Стр. 83 Рис. 2.13 – Технологическая схема формирования структуры кристалла транзистора со статической индукцией, основанная на принципе «жесткой» маски;

Стр. 88 Рис. 2.14 – Технологическая схема формирования структуры кристалла СИТ с прямоугольным затвором;

Стр. 89 Рис. 2.15 – Технологическая схема формирования структуры кристалла СИТ по принципу LOCOS и ускоренной диффузии;

Стр. 90 - Новая технологическая схема формирования структуры кристалла приборов со статической индукцией с планарным затвором – маршрут не приведен.

9. Заключение

Диссертационная работа Максименко Ю.Н. представляет органичное сочетание технического/практического подхода к анализу известных теоретических представлений о конструкторско-технологических и схемотехнических проблемах при создании мощных полупроводниковых приборов со статической индукцией, а также их моделировании, что может быть присуще только высококвалифицированному практикующему Разработчику полупроводниковых приборов.

Диссертация Максименко Ю.Н. – законченное исследование, в котором получены новые результаты, представляющие собой не тривиальное решение принципиальной научно-практической проблемы, имеющее приоритетное в настоящее время значение для развития отечественной ЭКБ и повышения обороноспособности страны.

Содержание автореферата полностью соответствует тексту диссертации.

Вывод

Таким образом, диссертационная работа **Максименко Юрия Николаевича** на тему «Мощные полупроводниковые приборы со статической индукцией» по своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований и практической значимости полученных результатов полностью соответствует требованиям ВАК РФ, а именно п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» утвержденного утвержденного

постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. 01.01.2025 г.),,,
предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 2.2.2 –
«Электронная компонентная база микро - и наноэлектроники, квантовых
устройств» (технические науки).

Исходя из вышеизложенного, автор диссертации **Максименко Юрий
Николаевич**, заслуживает присуждение ученой степени доктора технических
наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро – и
наноэлектроники, квантовых устройств» (технических науки).

Диссертация и отзыв на диссертационную работу обсуждены и
одобрены на заседании научно-технического совета Акционерного общества
«Научно-производственное предприятие «Пульсар» (протокол № 4/567-25 от
15 апреля 2025 г.)

Отзыв составил:

Г.н.с. лаборатории разработки СВЧ МИС
на широкозонных полупроводниках
и перспективных научных исследований,
доктор технических наук, с.н.с

15.04.2025г.

Электронный адрес: adonin@pulsarnpp.ru
Тел.: 8(495)3665566 доб. 1728

Адонин

*Максименко
Ю.Н.*

Подпись А.С. Адонина удостоверяю:

Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Пульсар»
Почтовый адрес: 105187, г. Москва, Окружной проезд, д. 27
Тел.: +7 (495)-365-12-30 Факс: +7 (495) 366-55-83
Электронный адрес: administrator@pulsarnpp.ru

Поступил в совет 05.05.2025
Озвучено 05.05.2025