

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора

АО «НПП «Пульсар»

Ю.В. Колковский

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Скорнякова Станислава Петровича на тему:
«Низковольтные диффузионные *p-n*-переходы с туннельным и смешанным механизмами пробоя в технике полупроводниковых приборов»,
представленной на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 2.2.2 - Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

1. Актуальность темы исследования

Актуальность диссертационного исследования Скорнякова Станислава Петровича, направленного на создание технологии получения планарно-диффузионных низковольтных *p-n*-переходов с туннельным и смешанным механизмами пробоя и разработке на их основе ряда чрезвычайно востребованных в электронной технике полупроводниковых приборов – стабилитронов, термокомпенсированных стабилитронов и ограничителей напряжения, обусловлена объективной тенденцией развития электронной техники в направлении создания радиоэлектронных устройств (РЭУ) с низкими уровнями питания, повышения точностных характеристик измерительной техники и управляющих систем (УС) для ракетной и ракетно-космической техники (РТ и РКТ), обеспечения защиты РЭУ от воздействия электромагнитных импульсов (ЭМИ) катастрофического характера естественного и искусственного происхождения. Низковольтные стабилитроны (НВС) служат низкоэнергетичными источниками опорного напряжения, прецизионные низковольтные термокомпенсированные

стабилитроны (НВ ПТКС) – источниками опорного напряжения для высокоточной измерительной техники, в т.ч. в качестве эталонов Вольты, высшие аттестуемые классы ПТКС – ультра-прецизионные термокомпенсированные стабилитроны (УАПС) – для командных приборов управляющих систем РТ и РКТ, а низковольтные ограничители напряжения (НВ ОН) – служат эффективными элементами защиты микросхем в составе РЭУ от наведённых ЭМИ грозовых разрядов, разрядов статического электричества и наведённых ЭМИ ядерного взрыва.

2. Характеристика содержания работы

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 166 наименований и 5 приложений. Общий объем работы составляет 277 страниц, включая 94 рисунка и 21 таблицу.

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 «Физико – технологические аспекты проблемы получения низковольтных диффузионных кремниевых *p-n*-переходов» представлены результаты анализа литературных данных, характеризующие «резкие» низковольтные *p-n*-переходы как с точки зрения физики присущих им механизмов пробоя, так и технологии изготовления на основе таких *p-n*-переходов НВ кремниевых *p-n*-структур.

Определены пути достижения базовой цели – создания технологии получения планарно-диффузионных “резких” НВ *p-n*-структур в сильнолегированном кремнии, замещающей технологию получения НВ *p-n*-структур по способу сплавления Al в Si, и соответствующих прикладных

целей – разработки на её основе промышленных технологий изготовления НВ планарно-диффузионных стабилитронов, термокомпенсированных стабилитронов и ограничителей напряжения.

В качестве наиболее перспективного в этом отношении выбран, исследован и доработан в соответствии с требованиями, выдвигаемыми нетривиальной задачей формирования “резких” НВ *p-n*-структур в сильнолегированном кремнии, метод диффузии в эвакуированном реакторе, обеспечивающий проведение процессов диффузии в условиях бескислородной среды из неограниченного источника. Причём, в качестве наиболее эффективной легирующей примеси для создания “резких” НВ *p-n*-структур выбран мышьяк, обладающий наивысшей относительно других легирующих примесей предельной растворимостью в кремнии, равным с кремнием тетраэдрическим радиусом атома и, относительно к другим легирующим примесям, низким коэффициентом диффузии, что способствует формированию высокого градиента концентрации, определяющего “резкость” *p-n*-перехода.

Во второй главе «Разработка технологии получения и исследование низковольтных диффузионных *p-n*-переходов» представлены результаты разработки, оптимизации и исследования процесса высококонцентрационной диффузии мышьяка в эвакуированном кварцевом реакторе из неограниченного источника диффузии в виде кристаллического As и “компенсирующего” источника бора в виде порошка сильнолегированного бором кремния и разработки на этой основе промышленной технологии производства низковольтных планарно-диффузионных кремниевых *p-n*-структур – базового элемента конструкции низковольтные стабилитронов и термокомпенсированных стабилитронов, а также низковольтных ограничителей напряжения, представляющих собой, по-существу, специфическую разновидность стабилитронов.

Целью проведённых исследований диффузионных *p-n*-структур был поиск способов оптимизации технологии, исключение негативных эффектов,

обусловленных «высококонцентрационностью» выбранного способа диффузии мышьяка, использование позитивных возможностей наблюдаемых физических эффектов.

Исследована зависимость электрических параметров НВ диффузионных p - n -переходов от толщины плёнки остаточного оксида кремния ($\text{SiO}_{2\text{ост.}}$) на поверхности легируемых пластин. Установлено, что $\text{SiO}_{2\text{ост.}}$ толщиной свыше ~ 50 Å представляет для диффузии As уже практически непреодолимый барьер. Допустимая толщина $\text{SiO}_{2\text{ост.}}$ – (15-20)Å.

Методами дифференциальной проводимости и нейтронно-активационным исследованы распределения As в p - n -структурах, получаемых высококонцентрационной диффузией As в эвакуированной ампуле. Показано, что их существенное различие объясняется присутствием части As в диффузионном слое в электрически неактивной форме в виде нейтральных кластеров вакансионного типа $V_{\text{Si}}\text{As}_2$ – метастабильных образований, которые могут быть активированы в результате низкотемпературных (НТ) отжигов, что позволяет использовать НТ отжиги для тонкой корректировки электрических параметров НВ p - n -структур.

Абсолютная регулярность экспериментальной зависимости напряжения пробоя диффузионных p - n -переходов от площади p - n -перехода $U_{\text{проб.м}}(S_{p-n})$ в области туннельного и смешанного пробоя, свидетельствует о том, что структурные дефекты в объёме сильнолегированного полупроводника не препятствуют равномерному распределению тока по площади таких p - n -переходов, подтверждая тем самым известные положения теории туннельного пробоя. Зависимость $U_{\text{проб.м}}(S_{p-n})$ позволяет использовать её как эффективный фактор управления электрическими параметрами НВ p - n -структур ($U_{\text{проб.}}, r_d$) при конструировании НВ стабилитронов, термокомпенсированных стабилитронов и ограничителей напряжения.

Полученная зависимость глубины залегания диффузионных p - n -переходов от режимов диффузии мышьяка $x_j(T, t)$ свидетельствует о возможности решения проблемы малопроникающих омических контактов

для НВ стабилитронных *p-n*-структур и обеспечивает возможность получения глубоких *p-n*-структур, что важно для силовых полупроводниковых приборов, в частности, ограничителей напряжения, – за счёт длительности процесса в эвакуированном реакторе диффузии из неограниченного источника.

В третьей главе «Разработка, исследование и производство низковольтных стабилитронов» приведены результаты анализа литературных данных по физике, конструированию и известным технологиям изготовления НВ стабилитронов (НВС) отечественными и зарубежными исследователями и результаты проектирования, разработки и внедрения в серийное производство на основе конструктивных литературных данных и разработанной технологии диффузии мышьяка отечественных планарно-диффузионных низковольтных стабилитронов (НВС) с напряжениями стабилизации от 2 В до 5,6 В, т.е. с туннельным и смешанным механизмами пробоя, в безкорпусном исполнении и в разнообразных корпусах для навесного и поверхностного монтажа.

В четвертой главе «Разработка, исследование и производство термокомпенсированных и прецизионных термокомпенсированных стабилитронов» представлены результаты анализа литературных данных по физике, конструированию и технологии изготовления термокомпенсированных стабилитронов (ТКС) отечественными и зарубежными исследователями, проектирования, разработки и внедрения в серийное производство на основе технологии диффузии мышьяка отечественных однокристалльных ТКС общего применения КС405А с напряжением стабилизации $6,2 \text{ В} \pm 5\%$ при токе 0,5 мА и серии прецизионных термокомпенсированных стабилитронов (ПТКС) специального применения 2С198А÷2С198К с напряжением стабилизации $6,3 \text{ В} \pm 1\%$ при токе 0,5 мА.

В пятой главе «Разработка, исследование и производство радиационно-стойких ультра-прецизионных термокомпенсированных стабилитронов» представлены результаты анализа литературных данных по

физике, конструированию и технологии изготовления термокомпенсированных стабилитронов (ТКС) отечественными исследователями (данные зарубежных разработчиков ПТКС недоступны) и создания на основе технологии диффузии As и результатов разработки ТКС типа 2С198А÷2С198К двухкристальных ультра-прецизионных термокомпенсированных стабилитронов 2СП101А÷2СП501Д класса точности 2 ppm, в т.ч. аттестуемых – УАПС.

В шестой главе «Разработка, исследование и производство низковольтных ограничителей напряжения» представлены результаты анализа литературных данных по физике, конструированию и технологии изготовления ограничителей напряжения отечественными и зарубежными исследователями (transient voltage suppressors), результаты разработки основных технических принципов конструирования и технологии изготовления этих новых в отечественной практике полупроводникового приборостроения НВ ограничителей напряжения, разработки и внедрения в серийное производство ряда кремниевых низковольтных ограничителей напряжения с напряжениями пробоя от 3 до 15 В, с импульсной мощностью рассеяния от 300 Вт до 1,5 кВт, в различных корпусах для навесного и поверхностного монтажа. Первый из которых и наиболее востребованный до сих пор – 1,5 кВт-ный ограничитель напряжения 2С408А с напряжением пробоя 6,2 В, предназначенный для защиты РЭУ с напряжением питания 5 В.

3. Достоверность и научная новизна диссертации

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

– разработка, в порядке замещения технологии сплавления Al в Si, оригинальной технологии получения низковольтных планарно-диффузионных *p-n*-структур с туннельным и смешанным механизмами

пробоя по методу высококонцентрационной диффузии As из неограниченного источника в эвакуированном реакторе;

– применение, помимо традиционных факторов (удельного сопротивления кремниевой подложки и режимов диффузии) новых эффективных факторов управления и тонкой корректировки величины основного электрического параметра низковольтных *p-n*-структур напряжения пробоя – величины площади *p-n*-перехода и НТ отжига;

– разработка оригинальной феноменологической методики расчёта системы конструкционно-технологических параметров прецизионных термокомпенсированных стабилитронов, в качестве отправной позиции которой положен теоретически неисследованный до настоящего времени параметр нелинейность температурной зависимости напряжения стабилизации ($\Delta U_{л.ст.}$). Впервые, экспериментальным путём зависимость параметра $\Delta U_{л.ст.}$ от плотности тока получена в настоящей диссертационной работе.

Доказательность результатов и выводов, сформулированных в исследовании подтверждается тем, что по теме диссертации автором и коллективами под руководством и с участием автора опубликовано 35 печатных работ (из них 14 работ, входящих в перечень ВАК по специальности 2.2.2), получено 13 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

Основные положения диссертационной работы представлены автором и коллективами с участием автора на 12 национальных и международных конференциях.

4. Значимость для науки и практики полученных результатов.

Предложен механизм деградации *p-n*-перехода ограничителя напряжения при воздействии ЭМИ, связанный с генерацией тепловых волн в области *p-n*-перехода при прохождении периодических импульсов перегрузки. Следствием этого является накопление механических

напряжений в области спа, как результат циклического нагрева, вплоть до расплавления, и охлаждения и последующего распространения поля механических напряжений до области залегания *p-n*-перехода, создающего поле накопленных структурных нарушений решётки кремния, что и приводит к деградации параметров *p-n*-перехода. В результате для повышения импульсной стойкости ограничителей напряжения применены серебрясодержащие припои, препятствующие накоплению механических напряжений в спае. Повышены требования к глубине залегания *p-n*-перехода.

Нужно отметить, что помимо высокой востребованности на отечественном рынке разработанных серий НВ стабилитронов, термокомпенсированных стабилитронов и ограничителей напряжения, представленные в диссертации низковольтные ограничители напряжения, в частности, 2С408А, и особенно – ультра-прецизионные термокомпенсированные стабилитроны серии 2СП101А÷2СП501Д обладают несомненным экспортным потенциалом.

5. Рекомендации по использованию результатов диссертации

Материалы диссертации Скорнякова С.П. могут представлять интерес для широкого круга научно-технических и производственных предприятий, занимающихся разработкой или производством новых радиоэлектронных устройств, в которые входят/могут входить низковольтные стабилитроны, термокомпенсированные стабилитроны и ограничители напряжения, 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, выбору эффективной легирующей примеси и способа получения НВ диффузионных *p-n*-переходов, к постановке экспериментов, объяснению выявленных

физических эффектов и приданию им статуса технологических факторов, в разработке процесса высококонцентрационной диффузии As в эвакуированном кварцевом реакторе, анализе и систематизации литературных данных и экспериментальных результатов исследований по теме диссертации, расчёте конструкций всех разработанных по теме полупроводниковых приборов.

Все приведённые в диссертации результаты получены лично автором или при непосредственном его участии и руководстве. Большая часть публикаций, идеи всех заявок на изобретения по теме диссертации также разработаны лично автором.

Автор был главным конструктором / научным руководителем 13 НИОКР по исследованиям, разработкам технологий, конструированию и внедрению в серийное производство НВ стабилитронов, НВ термокомпенсированных стабилитронов, в т.ч. прецизионных, и НВ ограничителей напряжения. Разработанная под его руководством технология получения НВ диффузионных *p-n*-структур нашла применение ещё в 21 ОКР по разработке НВ стабилитронов и ограничителей напряжения. На основе разработанных по его идеям и под его руководством НВ прецизионных термокомпенсированных стабилитронов проведены также три ОКР по разработке нового в отечественной электронике класса прецизионных источников опорного напряжения (ИОН) в “гибридно-интегральном” исполнении.

7. Замечания по диссертационной работе

1. Положения, выносимые на защиту, изложены не корректно, но они вытекают из текста диссертации: П.4 положения является результатом освоения в промышленности технологии изготовления приборов, но не положением, выносимым на защиту.

Результаты разработок не могут быть защищены так как они являются практической ценностью, а не научной новизной.

2. В Гл.2 указанный способ управления тонкой корректировкой электрических параметров в НВ диффузионных *p-n* структурах с помощью не диффузионных и низкотемпературных отжигов в диапазоне 400 – 900 °С неверен, т.к. начиная с 700°С и выше - это высокотемпературный процесс.
3. Стр.84, 85 Противоречие в изложении: «Температура испарения As 250°С... А с целью предотвращения образования поверхностных дефектов, перед введением в диффузионную печь, ампулу нагревают до 250°С», т.е. ниже температуры испарения.
4. На рис 2.24 не указан параметр. Рисунок 3.4 полностью не соответствует структуре кристалла.
5. В выражениях 1.2, 1,5, 1.11, 1.12, 1.14 и других один и тот же параметр имеет разное обозначение при сохранении физического смысла. Имеется не соответствие ссылок к выражениям (формулам) в тексте.

Указанные замечания не меняют общей положительной оценки диссертационной работы и не снижают ее научной и практической ценности.

8. Заключение

Диссертационная работа Скорнякова С.П. представляет собой случай органичного сочетания технического/практического подхода к анализу известных теоретических представлений о *p-n*-переходах с различными – туннельным, смешанным и лавинным формами пробоя и научного подхода к созданию базовой технологии получения планарно-диффузионных низковольтных *p-n*-переходов и новых полупроводниковых приборов на её основе, что может быть присуще только высококвалифицированному практикующему Разработчику полупроводниковых приборов.

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

Содержание автореферата полностью соответствует тексту диссертации.

9. Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Результаты исследований, представленные в диссертации, соответствуют следующим пунктам паспорта научной специальности ВАК РФ 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» (в соответствии с новой номенклатурой научных специальностей 2.2.2 – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств):

Пункт 1 – “Разработка и исследование физических принципов создания новых и совершенствования традиционных приборов твердотельной электроники, радиоэлектронных компонентов, изделий микро- и нанoeлектроники, приборов на квантовых эффектах, включая оптоэлектронные приборы и преобразователи физических величин (сенсоры)”:

- разработаны и исследованы физико-технические принципы совершенствования на основе планарно-диффузионной технологии низковольтных кремниевых стабилитронов, технология и конструкции которых базировались на *p-n*-структурах, получаемых сплавлением алюминия в сильнолегированный кремний, не обеспечивавших требования по технологичности и надёжности современной электронной техники, и создания нового в отечественной практике класса полупроводниковых приборов (ППП) защиты – низковольтных ограничителей напряжения;

Пункт 3 – “Разработка и исследование технологических основ создания и методов совершенствования изделий”:

- разработан, исследован и реализован технологический способ получения диффузионных низковольтных *p-n*-структур с туннельным и смешанным механизмами пробоя высококонцентрационной бескислородной диффузией мышьяка из неограниченного источника в эвакуированном реакторе, на основе которых усовершенствованы и созданы новые ППП.

Вывод

Таким образом, диссертационная работа **Скорнякова Станислава Петровича** на тему «Низковольтные диффузионные *p-n*-переходы с туннельным и смешанным механизмами пробоя в технике полупроводниковых приборов» по своей актуальности, научной новизне, объему выполненных исследований и практической значимости полученных результатов полностью соответствует требованиям ВАК РФ (п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней»), предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств» (технические науки).

Исходя из вышеизложенного автор диссертации **Скорняков Станислав Петрович**, заслуживает присуждение ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств» (технические науки).

Диссертация и отзыв на диссертационную работу обсуждены и одобрены на заседании научно-технического совета Акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Пульсар» «25» ноября 2021 г. (протокол № 2/548-21 от «25» ноября 2021 г.).

Отзыв составил:

Заместитель генерального директора

АО «НПП «Пульсар»,
доктор технических наук
заслуженный деятель РФ
25.11.2021г.

Владимир Федорович Синкевич

Электронный адрес: sinkevich@pulsarnpp.ru Тел.: +7 (495) 366-54-01
105187, г. Москва, Окружной проезд, дом 27 АО «НПП «Пульсар»

Подпись Синкевича В.Ф. удостоверен

Начальник ОРП

АО «НПП «Пульсар»

Сильевич Вознюк

Поступил в совет 09.12.2021
Ознакомлен 09.12.2021