

На правах рукописи



Скорняков Станислав Петрович

**Низковольтные диффузионные *p-n*-переходы с туннельным
и смешанным механизмами пробоя в технике
полупроводниковых приборов**

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

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена в Акционерном обществе
«Новосибирский завод полупроводниковых приборов Восток»

Научный консультант: **Горнев Евгений Сергеевич**, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, АО «НИИМЭ», заместитель руководителя приоритетного технологического направления по электронным технологиям.

Официальные оппоненты:

Петросянц Константин Орестович, доктор технических наук, профессор, Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», департамент электронной инженерии, профессор-исследователь;

Троян Павел Ефимович, доктор технических наук, профессор Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра физической электроники, заведующий кафедрой;

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, лаборатория технологии кремниевой микроэлектроники, заведующая лабораторией.

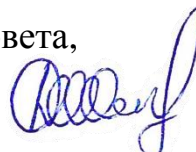
Ведущая организация: **Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Пульсар», г. Москва.**

Защита диссертации состоится 24 декабря 2021 г. в 11:00 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, I корпус, конференц-зал.

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

Автореферат разослан «___» октября 2021 г.

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



Д.И. Остертак

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Низковольтные кремниевые *p-n*-переходы с туннельным и смешанным механизмами пробоя – базовые элементы конструкций чрезвычайно востребованных низковольтных (НВ) классов полупроводниковых приборов (ППП): стабилитронов (НВС), термокомпенсированных стабилитронов (НВ ТКС) и ограничителей напряжения (НВ ОН). Основной объём производства на специализированном предприятии АО «Новосибирский завод полупроводниковых приборов Восток» (АО «НЗПП Восток») представляют именно низковольтные типонаминалы ППП.

Актуальность диссертационной работы заключается в объективной тенденции развития электронной техники в направлении создания радиоэлектронных устройств (РЭУ) с низкими уровнями питания и повышении точностных характеристик современных средств измерительной и оборонной техники, для которых разработанные в диссертации низковольтные стабилитроны (НВС) служат источниками опорного напряжения, прецизионные низковольтные термокомпенсированные стабилитроны (НВ ТКС) – источниками опорного напряжения для высокоточной измерительной техники, а также для ракетной и ракетно-космической техники (РТ и РКТ), а низковольтные ограничители напряжения (НВ ОН) – эффективными элементами защиты РЭУ от катастрофических электро-магнитных импульсов (ЭМИ) различной природы.

До проведения настоящей работы отечественное производство НВ стабилитронов, т.е. стабилитронов с напряжениями стабилизации (U_{cm}) менее ~ 7 Вольт, базировалось на технологическом процессе сплавления Al в Si *n*-типа проводимости (КЭФ). Сплавление Al в Si обеспечивает формирование “резких” *p-n*-переходов, т.е. *p-n*-переходов с предельно высоким значением градиента концентрации легирующей примеси (Al) – свыше 10^{24}см^{-4} .

Принципиальный изъян полупроводниковых приборов (ППП), получаемых сплавлением алюминия с кремнием, – низкий уровень временной стабильности и надёжности. Гарантируемый срок службы

(ресурс) “сплавных” стабилитронов не превышает 15 лет, длительность наработки – не более 100 000 ч. В то же время требования к ресурсу современных дискретных ППП, также как и интегральных микросхем (ИМС), существенно выше, – срок службы не менее 25 лет, длительность наработки не менее 150 000 ч.

Сплавная технология не обеспечивала также приемлемой технологической воспроизводимости электрических характеристик *p-n*-переходов и их распределения по площади кремниевых подложек, т.е. удовлетворительного уровня технологичности. Сплавные стабилитроны обладали значительными габаритами и весом, что существенно снижало тактико-технические характеристики радиоэлектронных устройств (РЭУ), в состав которых они входили.

Степень разработанности темы исследования.

Наиболее результативные, эффективные исследования и работы в области разработки планарно-диффузионных способов получения НВ *p-n*-переходов с туннельным и смешанным механизмами пробоя проводили известные отечественные ученые, такие как А.С. Сущик, А.Б. Юханов, В.К. Аладинский, А.В. Дробинин и др.

Однако до проведения настоящей работы задача разработки промышленной технологии получения планарно-диффузионных НВ *p-n*-переходов не была решена.

Целью диссертационной работы были, в порядке замещения сплавной технологии изготовления НВ *p-n*-структур, поиск, исследование и разработка эффективного способа получения НВ диффузионных *p-n*-структур, не уступающих по электрическим параметрам сплавным *p-n*-структурам, но превосходящих по технологичности и надёжности, исследование НВ диффузионных *p-n*-структур, получаемых этим способом, создание на этой основе технологии изготовления НВ диффузионных *p-n*-структур, удовлетворяющих требованиям стабильности и надёжности к современным ППП, создание на основе этой технологии промышленных

технологий изготовления планарно-диффузионных НВ стабилитронов, в т.ч. НВ ТКС, и НВ ОН, разработка и внедрение в серийное производство планарных НВ стабилитронов, термокомпенсированных стабилитронов и ограничителей напряжения.

Для достижения поставленной цели работы необходимо было решить следующие задачи:

1) провести анализ физико-технических аспектов многофакторной проблемы получения диффузионных НВ кремниевых *p-n*-переходов с электрическими параметрами, не уступающими электрическим параметрам НВ сплавных *p-n*-переходов;

2) провести анализ известных результатов поиска эффективного способа получения технологичных, надёжных НВ планарных диффузионных *p-n*-структур;

3) определить наиболее перспективный из неисследованных возможных способов получения НВ *p-n*-структур по планарно-диффузионной технологии;

4) исследовать выбранный способ формирования НВ диффузионных *p-n*-структур;

5) исследовать образцы НВ диффузионных кремниевых *p-n*-структур, изготовленных по выбранному способу;

6) разработать на основе выбранного способа промышленную технологию изготовления НВ диффузионных *p-n*-структур;

7) разработать и внедрить в серийное производство промышленные технологии изготовления в планарном исполнении НВ стабилитронов, НВ термокомпенсированных стабилитронов и НВ ограничителей напряжения;

8) разработать и внедрить в серийное производство НВ планарно-диффузионные стабилитроны, НВ термокомпенсированные стабилитроны и НВ ограничители напряжения.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что:

1) впервые в мировой практике, в порядке замещения технологии изготовления низковольтных *p-n*-структур с туннельным и смешанным механизмами пробоя сплавлением Al в Si, высококонцентрационной диффузией As из неограниченного источника в вакуированном реакторе изготовлены “резкие” низковольтные *p-n*-структуры с туннельным и смешанным механизмами пробоя, на основе которых возможно промышленное производство низковольтных стабилитронов;

2) впервые в мировой практике на основе низковольтных диффузионных *p-n*-структур с туннельным и смешанным механизмами пробоя, полученных высококонцентрационной диффузией As, разработаны и создано промышленное производство силовых полупроводниковых приборов защиты от катастрофических электро-магнитных импульсов (ЭМИ) – низковольтных ограничителей напряжения;

3) впервые установлено, что для разработки низковольтных стабилитронов, низковольтных ограничителей напряжения, низковольтных термокомпенсированных стабилитронов, помимо типовых факторов – удельное сопротивление кремниевой подложки и режимы диффузии, можно применить дополнительные эффективные факторы управления и тонкой корректировки величины основного электрического параметра низковольтных *p-n*-структур напряжения пробоя ($U_{\text{проб}}$) – величину площади *p-n*-перехода (S_{p-n}) и низкотемпературные отжижки;

4) впервые разработана оригинальная феноменологическая методика расчёта системы конструкционно-технологических параметров прецизионных термокомпенсированных стабилитронов с напряжением стабилизации 6,1 В при токе стабилизации 7,5 мА, отправной позицией которой является параметр нелинейность температурной зависимости напряжения стабилизации ($\Delta U_{\text{л.ст.}}$). Зависимость параметра $\Delta U_{\text{л.ст.}}$ от плотности тока для термокомпенсированного стабилитрона впервые получена в диссертационной работе экспериментальным путём.

Практическая ценность результатов работы:

- обоснована, разработана и внедрена в серийное производство эффективная промышленная технология получения “резких” НВ диффузионных p - n -структур по способу высококонцентрационной диффузии мышьяка в эвакуированной ампуле из неограниченного источника;
- на основе технологии изготовления НВ планарных p - n -структур высококонцентрационной диффузией As в эвакуированной ампуле разработаны промышленные технологии, разработаны и внедрены в серийное производство широкие ряды НВ планарных стабилитронов, НВ термокомпенсированных стабилитронов и НВ ограничителей напряжения в различном корпусном и безкорпусном исполнениях, в т.ч. в современных корпусах для поверхностного монтажа (SMD Case);
- предложена оригинальная феноменологическая методика расчёта термокомпенсированных стабилитронов (ТКС), позволяющая определить конструкционные параметры ($S_{p-n.o.}$, $S_{p-n.k.}$ – площади основного и компенсирующего p - n -переходов) и режимы формирования НВ диффузионных p - n -структур (T_{∂} , t_{∂});
- полученная впервые экспериментальным путём зависимость нелинейности напряжения стабилизации термокомпенсированного стабилитрона в диапазоне рабочих температур от напряжения пробоя и плотности тока через основной p - n -переход ТКС $\Delta U_{л.ст.}(U_{проб.о.}, J_{p-n.o.})$, позволила включить этот важный параметр в состав феноменологической методики ТКС, причём в качестве отправной позиции алгоритма расчёта конструкции термокомпенсированного стабилитрона;
- предложена система основных принципов конструирования и технологии изготовления ограничителей напряжения, включающая требования к глубине залегания p - n -перехода, толщине базы и площади p - n -перехода (x_j , W_{∂} , S_{p-n}), сопротивлению растекания в базе тока импульса перегрузки (R_s), сопротивлениям омических контактов и выводов (R_{κ} , R_{θ}), материалу термокомпенсаторов и топологии кристаллов.

Реализация результатов разработки и исследования низковольтных диффузионных *p-n*-структур. Разработаны и внедрены в серийное производство:

1) ряд серий НВ стабилизаторов общего и специального применения с напряжениями стабилизации от 2,0 В до 6,2 в корпусах для навесного и поверхностного монтажа и в безкорпусном исполнении;

2) прецизионные НВС 2С151А, 2С235А с U_{cm} 5,1 В 9,1 В при $I_{cm} = 50$ мкА с разбросом напряжения стабилизации $\pm 2\%$ и обратным током менее 50 нА;

3) серия НВ термокомпенсированных стабилизаторов общего применения КС405А, КС405Б с U_{cm} 6,2 В $\pm 5\%$ при I_{cm} 0,5 мА;

4) серия прецизионных НВ термокомпенсированных стабилизаторов специального применения 2С198А – 2С198К с U_{cm} 6,3 В $\pm 1\%$ при I_{cm} 0,5 мА класса точности 0,01 %;

5) серия НВ ультра-прецизионных, в том числе аттестуемых, термокомпенсированных стабилизаторов 2СП101А – 2СП501Д с напряжением стабилизации 6,1 В $\pm 1\%$ при I_{cm} 7,5 мА классов точности до 0,0002% (2 ppm);

6) серия НВ ограничителей напряжения в корпусах для навесного и поверхностного монтажа (SMD) с напряжениями пробоя от 3.9 В до 15 В;

7) ультра-прецизионные термокомпенсированные стабилизаторы с напряжением стабилизации ~ 7 В $\pm 0,2\%$ при токе стабилизации 500 мкА применены в качестве базовых элементов конструкции в разработках серии прецизионных интегральных источников опорного напряжения (ИОН).

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты разработки и исследования технологии изготовления “резких”, т.е. с градиентом концентрации $A_s \geq 10^{24} \text{см}^{-4}$, низковольтных планарно-диффузионных *p-n*-переходов по способу высококонцентрационной диффузии мышьяка в сильнолегированный

кремний из неограниченного источника в условиях эвакуированного реактора.

2. Результаты исследования электрофизических параметров разработанных НВ диффузионных *p-n*-переходов в зависимости от удельного сопротивления кремния, режимов диффузии мышьяка, НТ отжигов, площади / плотности тока через *p-n*-переход.

3. Результаты разработки на основе технологии высококонцентрационной диффузии As, исследования и внедрения в серийное производство НВ стабилитронов, НВ термокомпенсированных стабилитронов, в т.ч. ультра-прецизионных, и НВ ограничителей напряжения.

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 безкислородной диффузией мышьяка из неограниченного источника в эвакуированном реакторе, на основе которых усовершенствованы и созданы новые ППП.

Достоверность полученных результатов подтверждается методологией исследований, основанной на классических подходах к анализу данных по физике пробоя и способам получения *p-n*-структур, совокупностью разработанных технологий получения низковольтных диффузионных *p-n*-структур и промышленных технологий разработки и внедрения в серийное производство ряда низковольтных полупроводниковых приборов – стабилитронов, термокомпенсированных стабилитронов, ограничителей напряжения и источников опорного напряжения (ИОН) на основе прецизионных термокомпенсированных стабилитронов.

Исследование электрических параметров образцов НВ диффузионных кремниевых *p-n*-структур и НВ приборов на их основе проводилось с помощью высокоточных измерительных средств.

Личный вклад автора. Автору принадлежат инициативы в выборе целей и направлений работы, постановке задач и подходов к их решению, в личной разработке процесса высококонцентрационной диффузии As в эвакуированной кварцевой ампуле, теоретическом обосновании и расчёте конструкций всех разработанных под его руководством полупроводниковых приборов, анализе и систематизации литературных данных и экспериментальных результатов исследований по теме диссертации.

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 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, ограничителей напряжения. На основе разработанных под его руководством НВ прецизионных термокомпенсированных стабилитронов проведены три ОКР по разработке прецизионных источников опорного напряжения (ИОН) в “гибридно-интегральном” исполнении.

Автор был руководителем работ по передаче в серийное производство АО «ФОТОН», г. Ташкент, РУз, в качестве дублирующего предприятия, технологий изготовления ограничителей напряжения КС410АС (НВ ОН), КС511А, КС511Б, в т.ч. технологии высококонцентрационной диффузии As в вакуированном реакторе.

Основные результаты личного вклада автора в создание направления низковольтной тематики ППП АО «НЗПП с ОКБ», основанной на НВ диффузионных *p-n*-структурах, характеризуются следующим:

- автором предложен, лично разработан и исследован способ получения НВ *p-n*-структур на основе сильнолегированного кремния *p*-типа проводимости высококонцентрационной диффузией As из неограниченного источника в условиях бескислородной среды (эвакуированный кварцевый реактор);
- под руководством и при непосредственном участии автора проведено исследование электрофизических параметров образцов НВ диффузионных *p-n*-структур и их зависимости от основных технологических факторов и параметров конструкции;

- автором предложены и разработаны оригинальные способы управления / оптимизации электрических параметров и предотвращения патологической дефектности на поверхности НВ диффузионных *p-n*-структур в процессе формирования таких структур высококонцентрационной диффузией As;

- автором лично проведены расчёты конструкций и технологических параметров изготовления всех разработанных под его руководством полупроводниковых приборов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы представлены автором и коллективами с участием автора на: на семинаре “Влияние излучений на диффузию и фазовые переходы в твёрдых телах”, г.Кривой Рог, 1972 г.; XX, XXI обл. конф., посвящённых Дню Радио. Секция “Радиоэлектроника”. – Новосибирск, 1977 г. 1978 г.; XXVII обл. конф., посвящённой Дню Советской Науки и Дню Радио. Секция “Радиоэлектроника”. ГПНТБ СО РАН СССР, г. Новосибирск, 1984 г.; научно-технической конференции “Элементная база космических систем”, г.Сочи, 2005 г.; V Респ. научной конференции “Рост, свойства и применение кристаллов”, г. Андижан, 2008 г.; на Совецаниях Ассоциации заказчиков и потребителей унифицированных изделий электронной техники «Фонд УНИЭТ», Москва, 2012 г. 2013 г; международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», АН Руз, НПО «Физика Солнце», Ташкент, 2013 г.; XVI международной конференции молодых специалистов по микро / нанотехнологиям и электронным приборам, г. Новосибирск, 2014 г.; международной конференции “Фундаментальные и прикладные вопросы физики”, АН РУз, НПО «Физика – Солнце, г. Ташкент, 2015 г.; международной конференции “Фундаментальные и прикладные вопросы физики”, АН РУз, НПО «Физика – Солнце, г. Ташкент, 2017.

Публикации. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 35 научных работах, из них работ, опубликованных согласно перечню российских рецензируемых научных журналов по специальности

05.27.01, в которых опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание учёной степени доктора наук – 14. По теме диссертации получено 13 авторских свидетельства и патентов на изобретения в СССР и РФ.

Идеи всех изобретений, постановка экспериментов по их реализации, подготовка заявок на изобретения – личные достижения автора. Результаты исследований автора и их внедрения в разработки стабилитронов и ограничителей напряжения, а также интегральных источников опорного напряжения (ИОН) изложены в 27 научно-технических отчётах по НИОКР.

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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, её научная новизна, а также практическая значимость, представлены 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 семидесятые годы прошлого века электронная промышленность столкнулась с Проблемой замещения господствовавшей технологией получения низковольтных *p-n*-структур сплавлением алюминия в сильнолегированный кремний, лежащих в основе конструкции одного из самых востребованных классов полупроводниковых приборов низковольтных источников опорного напряжения – стабилитронов, диффузионной планарной технологией. К этому времени производство

практически всех электронных компонентов, как дискретных, так и интегральных, базировалось именно на этой высокопроизводительной и обеспечивающей высшие уровни надёжности технологии. В течение ряда лет решением этой проблемы безуспешно занимались такие ведущие предприятия электронной промышленности как ФГУП «САПФИР», ФГУП «ПУЛЬСАР» и ФГУП «НЗПП с ОКБ».

В диссертационной работе представлены результаты решения названной Проблемы на основе целевого анализа физики пробоя НВ кремниевых *p-n*-переходов и физико-технических аспектов формирования диффузионных *p-n*-структур с туннельным и смешанным механизмами пробоя. Естественно, решение этой Проблемы основано на изучении предшествующего опыта отечественных и зарубежных исследователей в этой области и имевшегося личного опыта получения и исследования планарно-диффузионных структур с напряжениями пробоя в диапазоне от единиц до 1000 В.

В диссертации приводятся результаты эффективного решения Проблемы получения низковольтных планарно-диффузионных *p-n*-структур с туннельным и смешанным механизмами пробоя разработанным способом высококонцентрационной диффузии мышьяка в сильнолегированный кремний в условиях эвакуированного кварцевого реактора (ампулы) из неограниченного источника, а также разработки на основе таких *p-n*-структур ряда серий НВ стабилитронов, термокомпенсированных стабилитронов, в т.ч. прецизионных, и низковольтных кремниевых ограничителей напряжения.

В ГЛАВЕ 1 «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.

Показано, что прогрессивная технология получения *p-n*-переходов по методу ионного легирования не обеспечивает требование создания “резких” НВ *p-n*-переходов с достаточной глубиной залегания – более ~ 3 мкм. Эпитаксиальная технология “резких” НВ *p-n*-переходов имеет определённые ограничения принципиального характера, связанные в основном с отсутствием эффективной технологии качественной защиты плоского *p-n*-перехода, выходящего на боковую грань кристалла, препятствующие широкому её использованию для производства стабилитронов и ограничителей напряжения.

Существующие технологии диффузии по методу “открытой трубы” не обеспечивают требования создания “резких” НВ *p-n*-переходов с градиентом концентрации легирующей примеси порядка 10^{24} см⁻⁴ и достаточной глубиной залегания. В качестве наиболее перспективного в этом отношении выбран и исследован метод “закрытой трубы”, т.е. метод высококонцентрационной диффузии в эвакуированном реакторе в условиях бескислородной среды из неограниченного источника. Причём, в качестве наиболее эффективной легирующей примеси, с точки зрения таких физических параметров как предельная растворимость в кремнии, тетраэдрический радиус атома, коэффициент диффузии, выбран мышьяк в кристаллическом виде.

В результате анализа физики пробоя НВ кремниевых *p-n*-переходов, установлены основные физические аспекты резких НВ *p-n*-переходов, на которые необходимо ориентироваться при оценке соответствия разрабатываемых НВ планарно-диффузионных *p-n*-переходов замещаемым НВ сплавным *p-n*-переходам, в том числе:

– в отличие от *p-n*-переходов с лавинным пробоем, для которых величина напряжения пробоя определяется в основном значением концентрации легирующей примеси в базе, напряжение туннельного пробоя НВ *p-n*-переходов существенно зависит как от концентрации легирующей примеси в базе, так и от концентрации легирующей примеси в

диффузионном слое, т.е. от величины так называемой эффективной концентрации легирующих примесей в p - n -переходе $N_{эфф} = \frac{N_a \cdot N_d}{N_a + N_d}$;

– важным параметром, по поведению которого можно судить о характере пробоя p - n -перехода, является температурный коэффициент напряжения пробоя (β , %/°C). В случае туннельного пробоя β_m – величина отрицательная, в случае лавинного пробоя – положительная. В области напряжений пробоя $\sim 4,7$ В зависимость β от $U_{проб}$ претерпевает плавный переход от отрицательных к положительным значениям и проходит через ноль;

– дифференциальное сопротивление НВ p - n -переходов (r_d) подчиняется N -образной зависимости от величины $U_{проб}$ с максимумом на границе перехода от туннельного к смешанному пробую ($U_{проб} \approx 4,7$ В) и минимумом на границе перехода от смешанного к лавинному пробую ($U_{проб} \approx 6,7$ В).

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 промышленных технологий и собственно НВ планарно-диффузионных стабилитронов, термокомпенсированных стабилитронов и ограничителей напряжения.

В ГЛАВЕ 2 «Разработка технологии получения и исследование низковольтных диффузионных p - n -переходов» представлены результаты исследования и оптимизации процесса диффузии мышьяка, выявившие факторы неприемлемого разброса электрофизических параметров диффузионных p - n -структур по пластине и пластин со структурами от процесса к процессу.

Установлено, что наиболее значимые факторы негативного характера обусловлены:

– наличием на диффузионном поле барьерного слоя остаточного оксида кремния;

– недостаточно воспроизводимыми скоростями высокотемпературной герметизации и последидиффузионного охлаждения загруженных кварцевых ампул.

Представлены результаты исследования нескольких типов высококонцентрационных источников диффузии мышьяка: в виде лигатуры, т.е. As спечённого с кремнием; As в кристаллическом виде и комбинированного источника диффузии As в виде кристаллического As и навески порошка сильнолегированного кремния марки КДБ0,001.

Оценка граничных условий проведения экспериментов по получению диффузионных *p-n*-структур с $U_{проб}$ в диапазоне (2÷15) В, т.е. с градиентом концентрации легирующей примеси (α_{p-n}) до 10^{24}см^{-4} , проведена с учётом критической величины напряжённости поля ($\mathcal{E}_m \approx 10^6$ В/см), начиная с которой квантовая вероятность туннелирования становится достаточно существенной. В результате для экспериментов выбран кремний марки КДБ с удельными сопротивлениями в диапазоне (0,001-0,1) Ом·см.

Исследована зависимость электрических параметров НВ *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. Выявлено их существенное различие вследствие присутствия части As в диффузионном слое в электрически неактивной форме в виде нейтральных кластеров вакансионного типа $V_{\text{Si}}\text{As}_2$ – метастабильных образований (рисунок 1), которые могут быть активированы в результате низкотемпературных (НТ) отжигов, что позволяет использовать НТ отжиги для тонкой корректировки электрических параметров НВ *p-n*-структур.

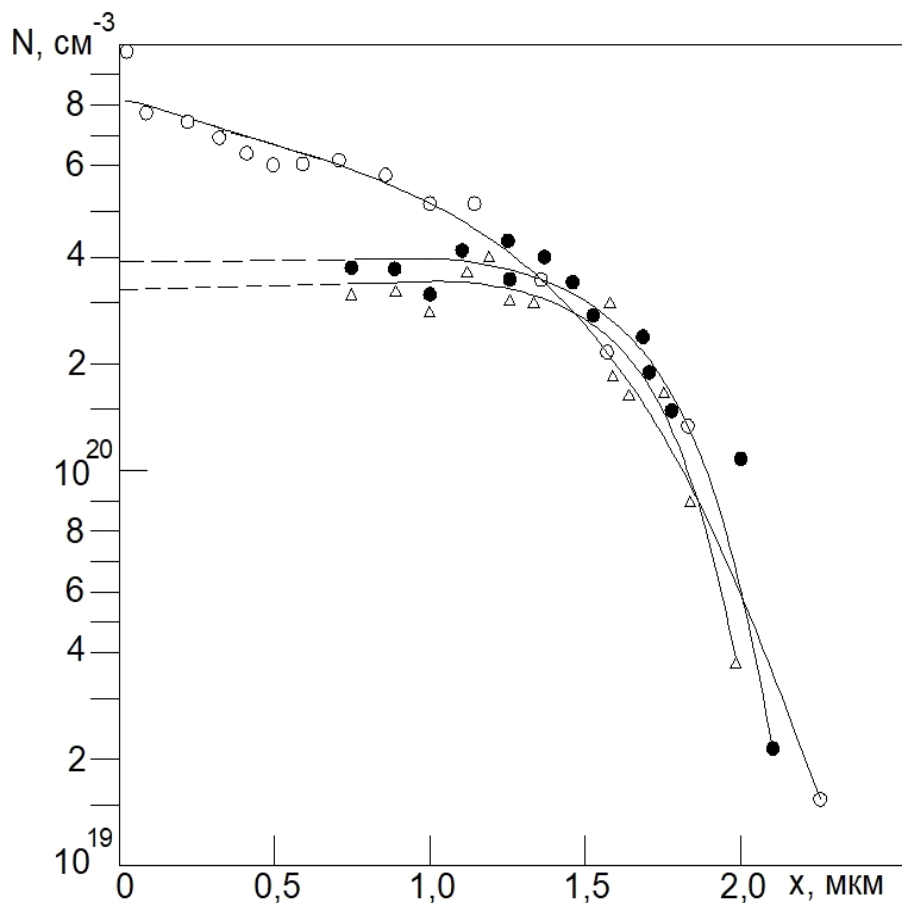


Рисунок 1 – Профили распределения мышьяка в сильно легированном кремнии:

- ○ ○ – диффузия из лигатуры (нейтронный активационный анализ);
- ● ●, Δ Δ Δ – диффузия, соответственно, из источников 400 мг, 200 мг As + 5 г кремния КДБ 0.001 (метод дифференциальной проводимости)

Получен пакет экспериментальных конструкционно-технологических зависимостей электрических параметров НВ диффузионных $p-n$ -структур ($U_{проб}$, r_d) от удельного сопротивления (ρ_v) кремниевой подложки p -типа проводимости (КДБ), от режимов и условий диффузии As (T , t , $v_{охл}$), от площади $p-n$ -перехода / плотности тока через $p-n$ -переход (S_{p-n} / J_{p-n}), рисунки 2-4.

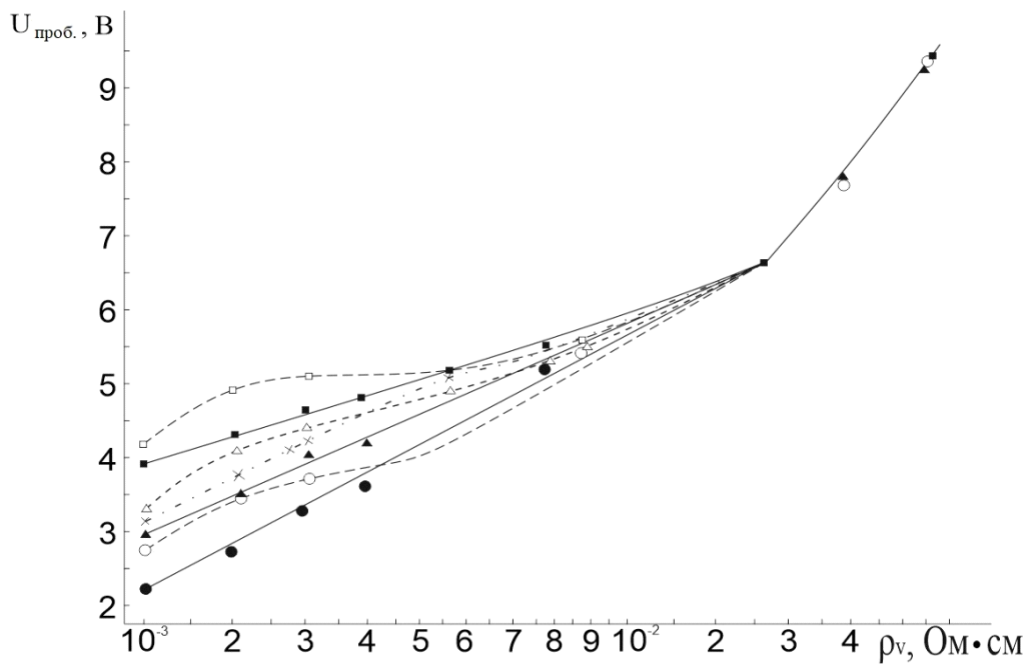


Рисунок 2 – Зависимость напряжения пробоя НВ диффузионных $p-n$ -переходов при токе 3 мА с различной площадью от удельного сопротивления подложки и условий отжига: —●—, - -○- - $S_{p-n} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$; —▲—, - -△- - $S_{p-n} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$; —■—, - -□- - $S_{p-n} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$; — резкое охлаждение ампулы (водой); - - - естественное охлаждение ампулы вне печи; -·x- отжиг $p-n$ -переходов с $S_{p-n} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ при 700°C , 30 мин.

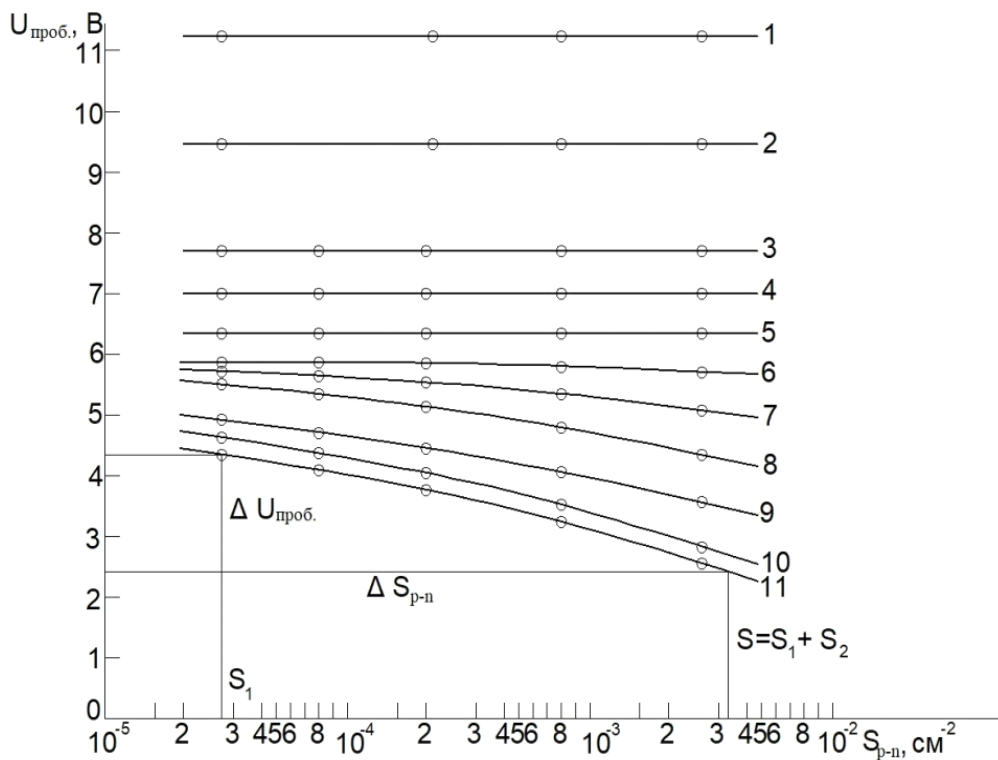


Рисунок 3 – Зависимость напряжения пробоя НВ $p-n$ -структур от площади $p-n$ -перехода: 1...11 → ρ_v , соответственно, 0,06; 0,04; 0,03; 0,025; 0,02; 0,01; 0,007; 0,0045; 0,003; 0,002; 0,001 Ом·см.

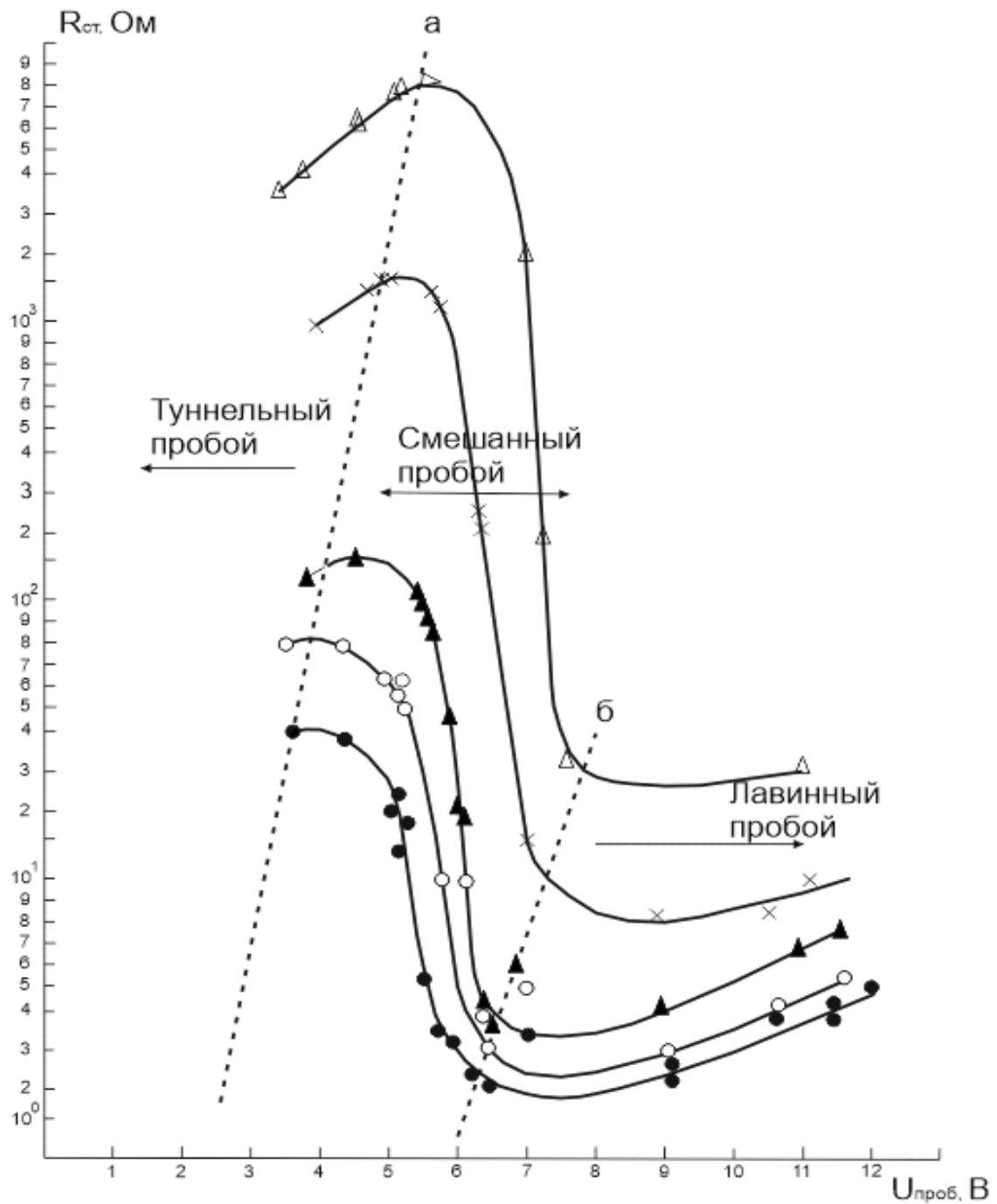


Рисунок 4 – Зависимость дифференциальных сопротивлений НВ диффузионных $p-n$ -переходов от напряжения пробоя при различных токах пробоя: $\bullet\bullet\bullet$, $\circ\circ\circ$, $\blacktriangle\blacktriangle\blacktriangle$, $\times\times\times$, $\triangle\triangle\triangle$ $I_{см} \rightarrow 10$ мА, 5 мА, 3 мА, 250 мкА, 50 мкА; а, б \rightarrow границы областей смешанного пробоя

Показано, что значения основных электрических параметров НВ $p-n$ -переходов ($U_{проб}$, r_d), полученных способом высококонцентрационной диффузии As в сильнолегированный кремний, для исследованного НВ диапазона напряжений пробоя (3-15) В практически совпадают с

аналогичными характеристиками НВ сплавных $p-n$ -переходов, что предоставляет возможность полного замещения сплавной технологии изготовления НВ $p-n$ -переходов диффузионной.

Полученная абсолютно регулярная экспериментальная зависимость напряжения пробоя диффузионных $p-n$ -переходов от площади $p-n$ -перехода $U_{проб.м}(S_{p-n})$ 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 $U_{проб.м}(S_{p-n})$ позволяет использовать её как эффективный фактор управления электрическими параметрами НВ $p-n$ -структур ($U_{проб.}$, r_d) при конструировании НВ стабилитронов, термокомпенсированных стабилитронов и ограничителей напряжения.

Примечательно, что поведение зависимостей $U_{проб}(S_{p-n})$ в исследуемой области напряжений пробоя также подчиняется закономерности изменения механизмов пробоя от туннельного к лавинному механизмам. Для значений $U_{проб} \geq 6$ В напряжение пробоя $p-n$ -переходов остается практически неизменным в широком диапазоне значений S_{p-n} . Ниже ~ 6 В наблюдается уменьшение значений $U_{проб}$ с ростом S_{p-n} для фиксированных значений p_v . Причём, для $p_v = (0,007 \div 0,001)$ Ом·см связь $U_{проб}(S_{p-n})$ носит регулярный нелинейный характер и может быть аппроксимирована в диапазоне значений $S_{p-n} = (3 \cdot 10^{-5} \div 2 \cdot 10^{-3})$ см² функцией вида:

$$U_{проб} = U_{проб.j} - K \cdot \lg(S_{p-n}/S_{p-n.j}), \quad (1)$$

где $U_{проб.j}$ – напряжение пробоя $p-n$ -перехода с площадью $S_{p-n.j}$; $U_{проб}$ – напряжение пробоя $p-n$ -перехода, изготовленного на кремнии с идентичным удельным сопротивлением, но с большей по величине площадью $S_{p-n} > S_{p-n.j}$; K – тангенс угла наклона рассматриваемой кривой, определяемый физическими параметрами НВ $p-n$ -перехода.

Абсолютно регулярный характер кривой зависимости $U_{проб} (S_{p-n})$ (см. рисунок 3) даёт также возможность сделать вывод о нечувствительности ВАХ $p-n$ -переходов с туннельным пробоем к структурным дефектам и, в том числе, к естественной деформации решётки сильнолегированного кремния.

В случае туннельного пробоя:

$$\frac{I_{dam}}{I_{perf}} \sim \frac{\exp(-\mathcal{E}_T/\mathcal{E}_{T.m.dam})}{\exp(-\mathcal{E}_T/\mathcal{E}_{T.m.perf})} \rightarrow 1, \quad (2)$$

что приводит для $U_{обр} \neq 0$ к следующему соотношению:

$$\mathcal{E}_{T.m.dam} = \mathcal{E}_{T.m.perf} \neq 0, \quad (3)$$

где \mathcal{E}_m – характеристическое поле туннельного пробоя; $\mathcal{E}_m \text{ Si} \sim 3,3 \cdot 10^7 \text{ В/см}$.

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 стабилитронных $p-n$ -структур и обеспечивает возможность получения глубоких $p-n$ -структур для силовых полупроводниковых приборов, в частности, – ограничителей напряжения.

На основе полученных результатов предложены способы управления и тонкой корректировки электрических параметров НВ $p-n$ -структур. Таким образом, с целью создания диффузионной технологии получения “резких” НВ планарных $p-n$ -структур, выбран показавший высокую в этом эффективность способ безкислородной диффузии As в сильнолегированный кремний p -типа проводимости в эвакуированном реакторе (вакуумированной кварцевой ампуле) из неограниченного источника, т.е. классический способ диффузии, описываемый уравнениями Фика.

Понятие “резкости” $p-n$ -переходов разъясняется с позиций величины градиента концентрации легирующей примеси в $p-n$ -переходе с туннельным пробоем и вида обратной ветви ВАХ $p-n$ -переходов с туннельным и лавинным механизмами пробоя. Концепция образования и распада кластеров

As разъясняется с позиций понятия эффективной концентрации для p - n -переходов с туннельным механизмом пробоя.

Рисунок 5 представляет расчетную зависимость эффективной концентрации ($N_{эф}$) от $U_{проб}$ для НВ p - n -переходов: As – диффузия мышьяка, Р – фосфора.

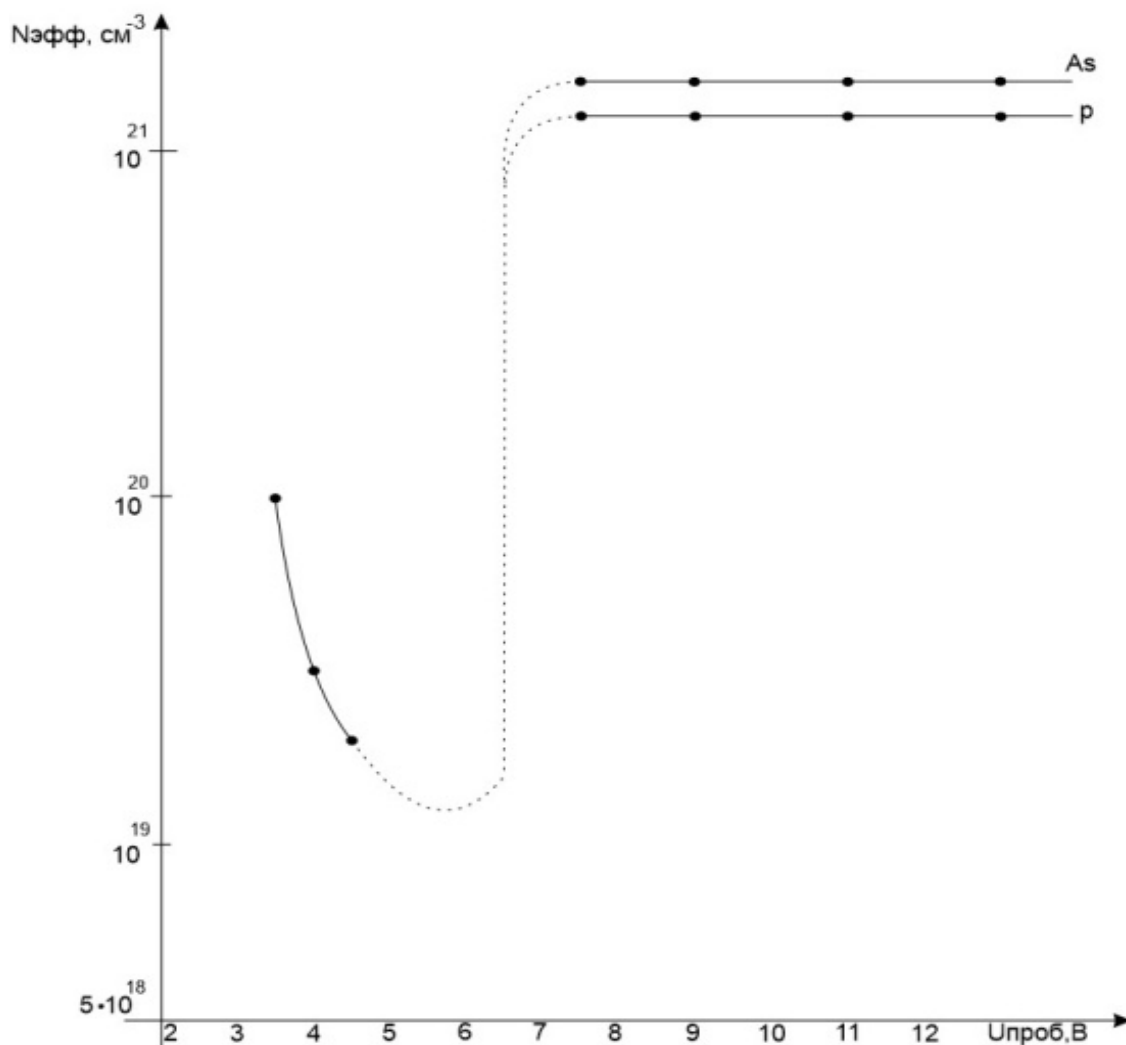


Рисунок 5 – Зависимость эффективной концентрации ($N_{эф}$) от напряжения пробоя $U_{проб}$ низковольтных p - n -переходов

То есть, максимальная напряженность электрического поля в p - n -переходе шириной менее 100 Å с туннельным пробоем не чувствительна к структурным нарушениям. Туннелирование в НВ p - n -переходе происходит равномерно по всей площади p - n -перехода вне зависимости от дефектности структуры.

В ГЛАВЕ 3 «Разработка, исследование и производство низковольтных стабилитронов» приведены результаты анализа литературных данных по технологии и конструированию НВ стабилитронов (НВС) отечественных и зарубежных исследователей, проектирования, разработки и внедрения в серийное производство на основе технологии диффузии мышьяка низковольтных стабилитронов (НВС) с напряжениями стабилизации от 2 В до 5,6 В в корпусах для навесного и поверхностного монтажа.

Вероятные технологии изготовления НВС зарубежными фирмами – технология локальной высококонцентрационной эпитаксии и высококонцентрационная p^+ -диффузия из плёнки легированного бором поликремния. Однако эти технологии обеспечивают получение НВ p - n -структур с напряжениями пробоя только свыше 4,3 В.

Первыми по технологии высококонцентрационной диффузии As разработаны две серии НВ стабилитронов в безкорпусном исполнении: серия стабилитронов 2С147Т-1 — 2С156Т-1 с $U_{ст}$ 4,7, 5,1, 5,6 Вольт и серия стабилитронов 2С124Д-1 — 2С143Д-1 с $U_{ст}$ 2,4, 2,7, 3,0, 3,3, 3,6, 3,9, 4,3 Вольт.

Принципиальное отличие разработанных серий стабилитронов друг от друга обусловлено “физикой их работы”: первые “работают” на смешанном механизме пробоя, вторые – на туннельном. В связи с этим при разработке стабилитронов 2С124Д-1 ÷ 2С143Д-1 впервые в практике конструирования НВ стабилитронов для целенаправленного получения заданных по параметру $U_{см}$ групп приборов оказалось возможным применить, помимо управляющего параметра удельное сопротивление подложки $\rho_v(N_B)$, параметр площадь p - n -перехода S_{p-n} (см. рисунок 3). В маршруте изготовления НВ стабилитронов присутствует также операция коррекции параметра напряжение стабилизации $U_{см}$ НТ отжигом при температуре 500°С в течение (1÷3) ч. на стадии изготовления пластин со структурами и после герметизации приборов в корпус.

В ГЛАВЕ 4 «Разработка, исследование и производство термокомпенсированных и прецизионных термокомпенсированных стабилитронов» представлены результаты анализа литературных данных по технологии и конструированию НВ стабилитронов (НВС) отечественных и зарубежных исследователей, проектирования, разработки и внедрения в серийное производство на основе технологии диффузии мышьяка НВ термокомпенсированных стабилитронов (ТКС) КС405А с напряжением стабилизации $6,2 \text{ В} \pm 5\%$ и серии прецизионных термокомпенсированных стабилитронов (ПТКС) 2С198А÷2С198К с напряжением стабилизации $6,3 \text{ В} \pm 1\%$ при токе $0,5 \text{ мА}$.

На основе результатов разработки и исследования НВ диффузионных *p-n*-структур, разработаны и освоены в серийном производстве ТКС общего применения типов КС405А. На основе стабилитронов КС405А разработаны ПТКС специального применения типов 2С198А ÷ 2С198К с $U_{ст}$ $6,3 \text{ В}$.

ТКС с напряжениями стабилизации ($U_{ст}$) $6,2 \text{ В}$, $6,3 \text{ В}$ представляют собой схему последовательного включения *p-n*-перехода при обратном смещении (основной *p-n*-переход) с напряжением пробоя ($U_{проб.о.}$) $\approx 5,6 \text{ В}$ и прямосмещённого *p-n*-перехода (компенсирующий *p-n*-переход) с падением прямого напряжения ($U_{пр.к.}$) $\approx 0,6 \text{ В}$, рисунок 6.

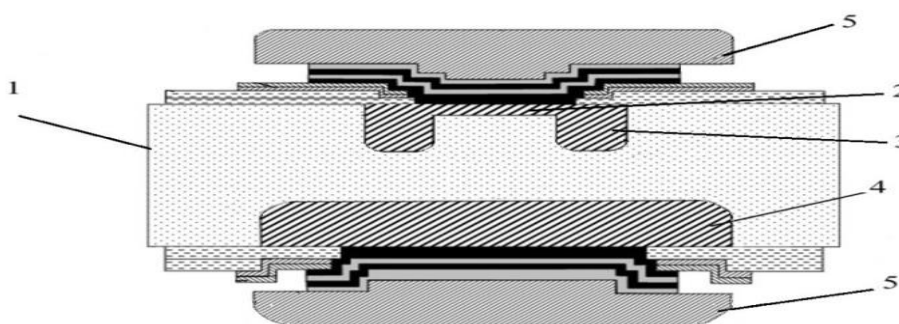


Рисунок 6 – Конструкция кристаллов ТКС КС405А, 2С198А÷2С198К: 1 – кремний КДБ0,005; 2 – основной *p-n*-переход (диффузия As); 3 – охранный *p-n*-переход (диффузия фосфора); 4 – компенсирующий *p-n*-переход; 5 – контактные выступы (V, Ag)

Такая схема позволяет скомпенсировать положительный температурный коэффициент $U_{проб.о.}$ основного $p-n$ -перехода ($\alpha U_{проб.о.}$) отрицательным температурным коэффициентом прямого падения напряжения $U_{пр.к.}$ с тем же по модулю значением на компенсирующем $p-n$ -переходе ($\alpha U_{пр.к.}$):

$$\alpha U_{ст} = (+)U_{проб.о} + (-)\alpha U_{пр.к.} \rightarrow 0 \quad (4)$$

Приведены результаты расчёта конструкции ТКС с напряжением стабилизации 6,2 В на основе разработанной феноменологической методики.

Проведены сравнительные исследования основных функциональных параметров разработанных термокомпенсированных стабилитронов КС405А и их зарубежных аналогов – стабилитронов 1N4567.

В ГЛАВЕ 5 «Разработка, исследование и производство радиационно-стойких ультра-прецизионных термокомпенсированных стабилитронов» представлены результаты создания на основе технологии диффузии As термокомпенсированных стабилитронов высшего класса, предназначенных для использования в командных приборах систем управления ракетной и ракетно-космической техники (РТ и РКТ) в качестве прецизионных источников опорного напряжения, в т.ч., и в качестве эталонов Вольта. Прецизионные термокомпенсированные стабилитроны с повышенной радиационной стойкостью с напряжением стабилизации 6,2 В $\pm 2\%$ при токе 500 мкА применены также в качестве базовых элементов в конструкциях ряда прецизионных термокомпенсированных стабилитронов в гибридном интегральном исполнении (источники опорного напряжения ИОН): ИМС типов 1380ЕС013, 1380ЕН014, 1394ЕС013, 1380ЕС025 ÷ 065

Разработка ультра-прецизионных, в т.ч. аттестуемых термокомпенсированных стабилитронов 2СП101А ÷ 2СП501Д (УАПС) с напряжением стабилизации 6,1 В $\pm 2\%$ при токе 7,5 мА УАПС класса точности до 2 ppm проведена с привлечением разработанной феноменологической модели ТКС, основанной на экспериментальных зависимостях $\alpha U_{проб.о.}$, $\alpha U_{пр.к.}$ от плотностей токов через основной и

компенсирующий $p-n$ -переходы, а также ещё одного важного температурозависимого параметра ТКС – впервые полученной экспериментальным путём зависимости нелинейности напряжения стабилизации в диапазоне температур ($\Delta U_{л.ст.}$, мкВ) от плотности тока через основной $p-n$ -переход, причём использованной в качестве отправной позиции алгоритма расчёта конструкции ТКС, рисунки 7 – 9.

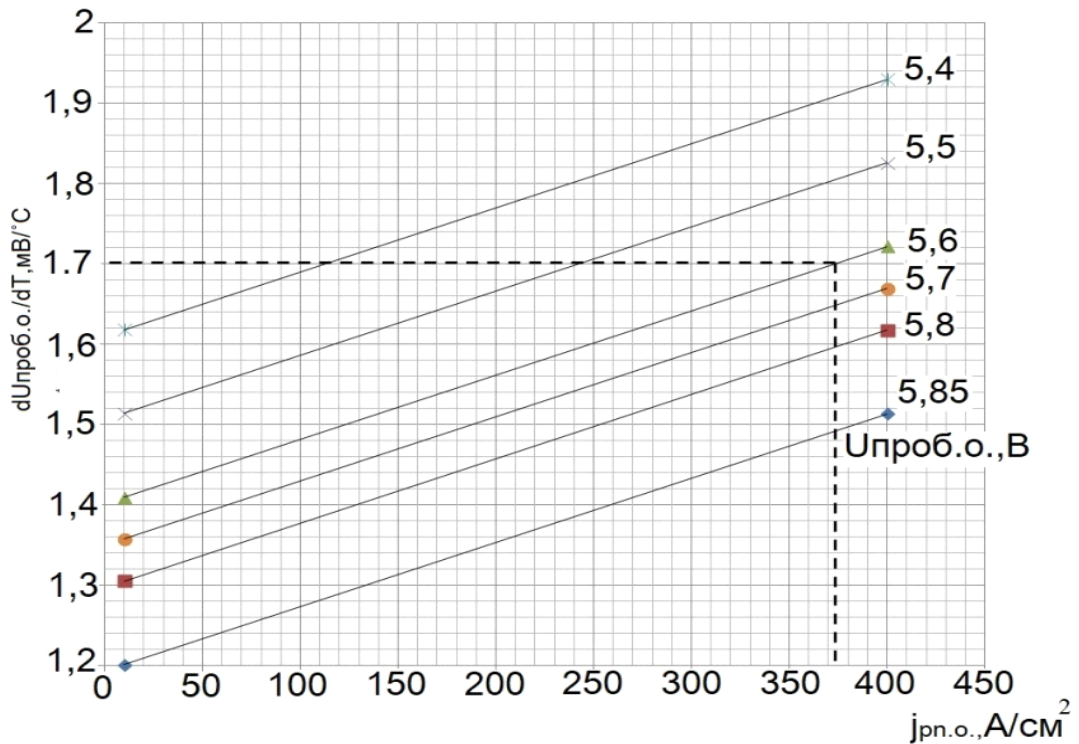


Рисунок 7 – Экспериментальные зависимости температурного коэффициента напряжения пробоя основного $p-n$ -перехода ($\alpha U_{проб.о.}$) от плотности тока ($J_{p-n.o.} = I_{ст.}/S_{p-n.o.}$) при разных значениях $U_{проб.о.}$ для $I_{ст.} = 7,5$ мА

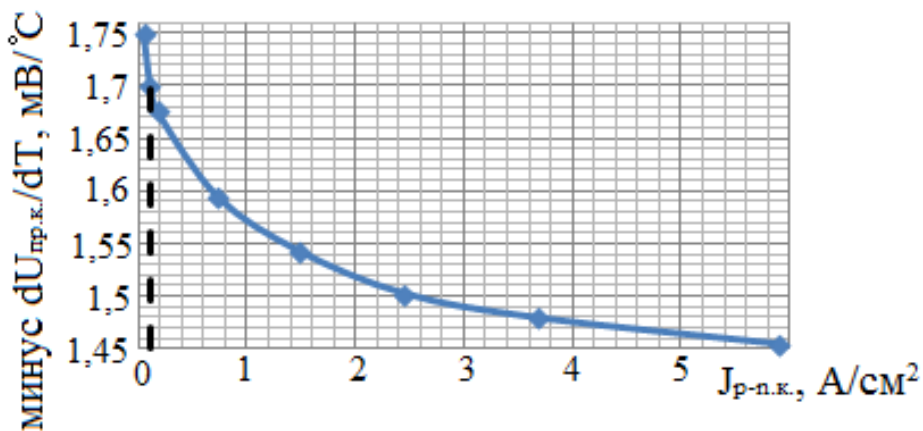


Рисунок 8 – Экспериментальная зависимость температурного коэффициента падения прямого напряжения на компенсирующем $p-n$ -переходе ($\alpha U_{пр.к.}$) от плотности тока ($J_{p-n.к.} = I_{ст.}/S_{p-n.к.}$) для $U_{проб.к.} = 9$ В, $I_{ст.} = 7,5$ мА

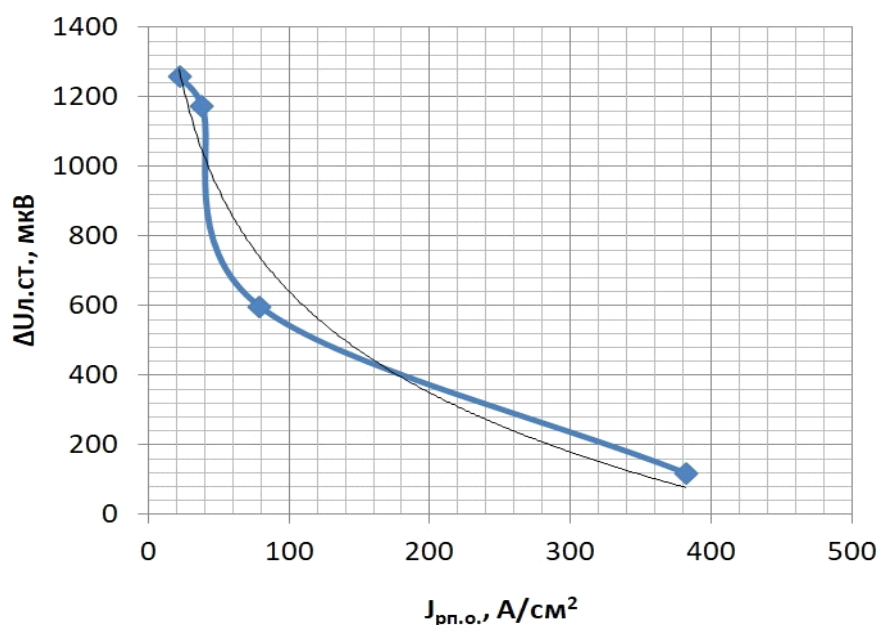


Рисунок 9 – Экспериментальная и аппроксимационная зависимости величины нелинейности ($\Delta U_{л.ст.}$) ТКС от плотности тока через основной $p-n$ -переход ($J_{p-n.o.}$) для $S_{p-n.o.} = 2 \cdot 10^{-5} \text{см}^2$

Совокупность этих зависимостей позволяет определить конструкционные параметры ($S_{p-n.o.}$, $S_{p-n.k.}$) и режимы диффузии (T , t) для получения “основного” и “компенсирующего” кристаллов ТКС с требуемыми основными параметрами УАПС: $U_{см}$, $\alpha U_{см}$, $\Delta U_{л.ст.}$.

В таблице 1 приведены для сравнения основные параметры разработанных в диссертации ТКС типов КС405А, 2С198А, 2СП301А.

Таблица 1 – Сравнение стабилитронов КС405А, 2С198А, 2СП301А

Параметр	КС405А	2С198А	2СП301А
$U_{см}$, В	$6.2 \pm 5 \%$	$6.3 \pm 1 \%$	$6.1 \pm 2 \%$
$I_{см}$, мА	0.5	0.5	7.5
$\alpha U_{см}$, %/°С	0,002	0,0005	0,0002
$U_{ш}$, мкВ	–	< 40	< 2
$\delta U_{см}$, %, за 1000 ч.	0,05	0,002	0,0002
РС (макс. уход $U_{см}$), мВ	–	~70	~1,5

Показано, что для термокомпенсированных стабилитронов, изготавливаемых на сильно легированном кремнии, т.е. с высокой концентрацией типозадающей примеси в базе, основной радиационно-

чувствительный параметр – падение прямого напряжения на компенсирующем *p-n*-переходе ($U_{пр.к.}$). Следствием этого явилось двухкристальное исполнение УАПС: основной и компенсирующий *p-n*-переходы формируются в отдельных кристаллах. Достаточно эффективное повышение радиационной стойкости двухкристальных УАПС достигнуто за счёт легирования золотом кристалла с компенсирующим *p-n*-переходом.

В обеспечение разработки УАПС, помимо феноменологической модели расчёта его конструкционно-технологических параметров, создан прецизионный метрологический комплекс, размещённый в экранированном подвальном помещении с точностью поддержания температуры $22 \pm 1^\circ\text{C}$, с автономным питанием и электрометрическим заземлением с сопротивлением менее 0,4 Ом. В основе комплекса лежит мера напряжения МН4-21 класса точности 0,1 ppm, построенная на элементах Джозефсона, – практически вторичного эталона Вольта, поверенного относительно первичного эталона Вольта в головном институте Госстандарта ФГУП «ВНИИМ», г. Санкт-Петербург.

В ГЛАВЕ 6 «Разработка, исследование и производство низковольтных ограничителей напряжения» представлены результаты исследования, разработки на основе НВ диффузионных *p-n*-структур и внедрения в серийное производство нового в отечественной электронной технике класса полупроводниковых приборов – кремниевых низковольтных ограничителей напряжения с напряжениями пробоя менее 7 В, необходимых для защиты микроэлектронных РЭУ с низкими уровнями напряжения питания.

Приведены результаты анализа и экспериментальных исследований возможных технологических способов получения достаточно глубоких *p-n*-структур, пригодных для изготовления таких силовых приборов как НВ ОН: эпитаксиального способа, а также квазиэпитаксиального способа – сращиванием кремниевых пластин методом капиллярного втягивания

алюминия с последующим выведением Al через *p*-слой кремния под действием поперечного градиента температуры в реакторе.

В отличие от стабилитронов, работающих в условиях рассеяния постоянной мощности, ограничители напряжения функционируют в динамическом импульсном режиме, при котором необходимо рассеяние мощной тепловой волны, генерируемой в области пространственного заряда *p-n*-перехода. Эффективное поглощение тепловой волны достигается за счёт большой площади *p-n*-перехода (кристалла) и тем, что кристалл ОН с *p-n*-переходом помещается между двумя массивными медными дисками, покрытыми серебром.

Предложен механизм отказа ограничителей напряжения, связанный с генерацией тепловых волн из области *p-n*-перехода при прохождении периодических импульсов перегрузки, выражающимся в циклическом импульсном нагреве – охлаждении припоя спае кристалла ОН с термокомпенсатором и, как следствие, с накоплением механических напряжений в области спае. Последующее распространение поля механических напряжений до области залегания *p-n*-перехода, приводит к нарушениям структуры решётки кремния, образованию избыточных дислокаций несоответствия что, в свою очередь, приводит к деградации параметров *p-n*-перехода. И это воздействие тем “эффективнее”, чем ближе *p-n*-переход к поверхности кристалла.

Визуально это проявляется в виде нарастающего смягчения обратной ветви ВАХ ограничителя или измерении тока утечки ($I_{обр}$) при определённом обратном напряжении ($U_{обр}$) после воздействия пачек импульсов вплоть до критического импульса. Показано, что использование серебросодержащих припоев (например марки ПСр2,5) способствует снижению уровня остаточных механических напряжений в спае и тем самым – повышению импульсной стойкости ограничителей напряжения.

При конструировании ОН необходимо учитывать, что крутизна обратной ветви ВАХ *p-n*-перехода ОН, а значит и эффективность его работы,

характеризуемая, помимо времени включения и коэффициента ограничения ($K_{огр.и.} = U_{огр.и.}/U_{проб}$), величиной динамического сопротивления p - n -перехода (r_d), падением напряжения на базе (сопротивлением растекания) $R_b = \rho_b \left(\frac{W_b}{S_{p-n}} \right)$ и сопротивлениями омических контактов (R_k) и выводов (R_v):

$$U_{огр.и.} = I_{и.} \left[r_d + \rho_b \left(\frac{W_b}{S_{p-n}} \right) + R_k + R_v \right]. \quad (5)$$

Для p - n -структур с $U_{проб}$ 6,2 В (ограничитель напряжения 2С408А) длительной диффузией As достигнута глубина залегания p - n -перехода ~ 15 мкм, что оказалось вполне достаточным для обеспечения требуемой импульсной стойкости. Для p - n -структур с $U_{проб}$ 3,9 В (ограничитель напряжения 2С414А) достигнута глубина залегания p - n -перехода ~ 8 мкм, что оказалось недостаточным для обеспечения запаса по требуемой импульсной стойкости. Положительный результат обеспечен за счёт диффузионно-эпитаксиальной конструкции кристалла, где поверх диффузионного слоя наносится дополнительный эпитаксиальный n^+ -слой, легированный фосфором толщиной ~ 15 мкм.

Практически все серии выпускаемых в мире ограничителей напряжения, представленных в Data Sheets зарубежных фирм, начинаются с номинала с $U_{проб}$ 6.8 В. Конструкции НВ ОН зарубежных производителей базируются, в основном на так называемом “стабисторном” принципе последовательной сборки кристаллов с прямосмещёнными p - n -переходами – серия transient Voltage Suppressors GHV-2÷GHV-16 ф. G.S.I., Inc.

В таблице 2 приведены результаты исследований образцов ограничителей напряжения с напряжениями пробоя 3,9 В (2С414А), 6,2 В (2С408А), изготовленных методом диффузии As, и образцов аналогов – типов GHV-6, GHV-8 свидетельствующие о значительном функциональном превосходстве (по времени включения и максимальной импульсной мощности) разработанных НВ ОН в сравнении с зарубежными аналогами.

Таблица 2 – Сравнение отечественных НВ ОН с зарубежными аналогами

Прибор	$U_{проб}$ В	$I_{проб}$ мА	$U_{огр.и.макс}$ В	$I_{огр.и.макс}$ А	$K_{огр.и.}$	$t_{вкл}, c$ (расчёт)
GHV-2	4,0	10	15	100	3,7	10^{-8}
2С414А	3,9	1	7,5	200	1,5	10^{-12}
GHV-8	5,4	10	18	100	3,3	10^{-8}
2С408А	6,2	10	8,5	150	1,3	10^{-12}

Первый, освоенный в серийном производстве АО «НЗПП с ОКБ» на основе диффузии As и самый массовый до настоящего времени ОН, это – 1,5 кВт-ный ограничитель 2С408А с напряжением пробоя 6,2 В, предназначенный для защиты РЭА с напряжением питания 5 В.

В дальнейшем разработаны и освоены в серийном производстве несколько других типов НВ 1,5 кВт-ных ОН в корпусах для навесного монтажа КД-21, КД-9, КД-7Е: 2С414А (3,9 В), КС410АС (8,2 В), 2С503АС (12 В), 2С501А (15 В), а также 22 типа НВ ОН в SMD корпусах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Обоснована целесообразность выбора, разработан, исследован и оптимизирован процесс высококонцентрационной диффузии мышьяка в сильнолегированный кремний *p*-типа проводимости из неограниченного источника, обеспечивающий формирование надёжных НВ *p-n*-переходов с туннельным и смешанным механизмами пробоя.

2. На основе процесса высококонцентрационной диффузии мышьяка разработана эффективная технология формирования “резких” НВ кремниевых *p-n*-структур, замещающая технологию получения НВ *p-n*-структур сплавлением алюминия в кремний *n*-типа проводимости.

3. Выявлены негативные факторы разработанной технологии. В частности, влияния избыточной толщины барьерного остаточного оксида кремния ($SiO_{2ост.}$) в областях диффузии мышьяка в кремний и обладающих проводимостью металлоидных образований As на поверхности легируемых мышьяком планарных структур. Предложены способы нейтрализации этих факторов за счёт введения жёсткого регламента проведения подготовительных операций по химической обработке легируемых

кремниевых пластин и кварцевой оснастки, условий нагрева загруженных кварцевых ампул на стадии их вакуумирования и герметизации, а также загрузки ампул в диффузионную печь, и условий охлаждения ампул на стадии извлечения их из диффузионной печи.

4. Получен пакет экспериментальных зависимостей электрических параметров НВ диффузионных p - n -структур ($U_{проб}, r_d$), изготовленных по технологии высококонцентрационной диффузии As, от удельного сопротивления (ρ_v) кремниевой подложки p -типа проводимости (КДБ), от режимов и условий диффузии As: температуры, времени, скорости последиффузионного охлаждения ампул, – от площади p - n -перехода / плотности тока через p - n -переход (S_{p-n} / J_{p-n}), необходимый и достаточный для конструирования и технологии изготовления НВ стабилитронов, термокомпенсированных стабилитронов и ограничителей напряжения.

5. Показано, что регулярная экспериментальная зависимость напряжения пробоя диффузионных p - n -переходов с туннельным и смешанным механизмами пробоя от площади p - n -перехода $U_{проб}(S_{p-n})$ свидетельствует о равномерности распределения тока по площади p - n -переходов, подтверждая тем самым основные положения теории туннельного пробоя о несущественной роли структурных дефектов в механизме туннельного пробоя, и позволяет использовать эту зависимость как эффективный фактор управления основными электрическими параметрами НВ p - n -структур ($U_{проб}, r_d$).

6. Показано, что разработанный процесс высококонцентрационной диффузии мышьяка из неограниченного источника в условиях эвакуированного реактора, несмотря на относительно низкий коэффициент диффузии As, обеспечивает, за счёт длительного времени диффузии, возможность получения глубоких p - n -структур, достаточных для изготовления НВ силовых полупроводниковых приборов, в частности, – ограничителей напряжения.

7. Методами дифференциальной проводимости и нейтронно-активационным выявлено наличие части As в сильнолегированном диффузионном слое в электрически неактивной форме в виде нейтральных

кластеров вакансионного типа $V_{Si}As_2$ – метастабильных образований, которые могут быть активированы в результате низкотемпературных (НТ) отжигов.

8. Показано, что для целенаправленного получения прецизионных по параметру “напряжение стабилизации (U_{cm})” типоминималов НВ стабилитронов эффективна тонкая корректировка величины U_{cm} НТ отжигами как НВ p - n -структур в пластинах, так и НВ стабилитронов в стеклянных корпусах, в частности, – при температуре 500°C.

9. Впервые экспериментальным путём выявлена зависимость параметра “нелинейность напряжения стабилизации в диапазоне температур” термокомпенсированных стабилитронов ($\Delta U_{л.ст.}$, мкВ) от напряжения пробоя и плотности тока через основной p - n -переход ТКС ($U_{проб.о.}$, $J_{p-n.o.}$).

10. С учётом параметра нелинейность напряжения стабилизации $\Delta U_{л.ст.}$, как отправной позиции алгоритма расчёта, разработана феноменологическая методика расчёта прецизионного ТКС, позволяющая рассчитать основные параметры основного и компенсирующего p - n -переходов, соответствующие им основные конструкционные и технологические параметры, обеспечивающие требования к электрическим параметрам прецизионных термокомпенсирующих стабилитронов в целом, и оптимизировать конструкции разработанных ТКС применительно к широкому диапазону токов стабилизации / плотностей токов через p - n -переходы.

11. Впервые в мировой практике диффузия As, отличающегося относительно низкой скоростью диффузии, применена для получения глубоких p - n -структур, лежащих в основе конструкции силовых полупроводниковых приборов – НВ ограничителей напряжения.

12. Предложен механизм отказа ограничителей напряжения, связанный с генерацией тепловых волн из области p - n -перехода при прохождении периодических импульсов перегрузки в результате циклического импульсного нагрева – охлаждения припоя в спае кристалла ОН с термокомпенсатором и, как следствие, с накоплением механических напряжений в области спая с последующим распространением поля механических напряжений до области залегания p - n -перехода, создающее

поле структурных нарушений решётки кремния, что и приводит к деградации параметров $p-n$ -перехода.

13. На основе созданной в диссертации промышленной технологии получения НВ $p-n$ -структур высококонцентрационной диффузией мышьяка разработаны и внедрены в серийное производство АО «НЗПП с ОКБ»:

- ряд серий стабилитронов в безкорпусном и различном корпусном исполнении, разных токов стабилизации, разной статической мощности, специального и общего применения с напряжениями стабилизации до 5,6 В;

- прецизионные (по напряжению стабилизации) стабилитроны 2С151А, 2С235А с U_{cm} 5,1 В $\pm 2\%$, 9,1 В $\pm 2\%$ при $I_{cm} = 50$ мкА с обратным током менее 50 нА;

- термокомпенсированные стабилитроны общего применения КС405А, КС405Б с напряжением стабилизации 6,2 В $\pm 5\%$ при токе 0,5 мА;

- серия прецизионных (по долговременной стабильности) термокомпенсированных стабилитронов специального применения 2С198А÷2С198К с напряжением стабилизации 6,3 В $\pm 1\%$ при токе 0,5 мА;

- серия ультрапрецизионных термокомпенсированных стабилитронов специального применения 2СП101А ÷ 2СП501Д, в т.ч. аттестуемых, с напряжением стабилизации 6,1 В $\pm 2\%$ при токе 7,5 мА классов точности до 0,0002% (2 ppm), с напряжением НЧ шума менее 2 мкВ; нелинейностью температурной зависимости напряжения стабилизации ($\Delta U_{л.см.}$) менее 250 мкВ;

- прецизионные термокомпенсированные стабилитроны с напряжением стабилизации 6,2 В $\pm 0,2\%$ при токе 500 мкА применены в качестве базовых элементов в конструкциях ряда прецизионных источников опорного напряжения (ИОН) в гибридном интегральном исполнении;

- ряд НВ ограничителей напряжения с напряжениями пробоя от 3,9 В до 15 В и импульсной мощностью от 0,3, 0,5, 1,5 кВт в корпусах для навесного и поверхностного монтажа;

- ограничители напряжения КС410АС, КС511А, КС511Б, разработанные на основе результатов настоящей работы, внедрены в серийное производство предприятия - дублёра – АО «ФОТОН», г. Ташкент.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В работах, опубликованных по специальности в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ:

1. Скорняков С.П., Сапогова Ф.Н., Топчилова Л.А. Планарные низковольтные стабилитроны // Электронная техника. – Сер.2. Полупроводниковые приборы. – 1976. – Вып.4. – С.75 – 76.

2. Скорняков С.П., Мельник И.Г., Колосницын А.И. Предотвращение кристаллизации плёнок SiO₂ при длительной диффузии бора в кремний // Электронная техника. – Сер.2. Полупроводниковые приборы. – 1976. – Вып. 5. – С.63 – 65.

3. Скорняков С.П. Получение р-п-переходов в сильнолегированном кремнии методом ампульной диффузии мышьяка // Электронная техника. – Сер.2. – Полупроводниковые приборы. – 1979. – Вып.4. – С.91 – 97.

4. Андреев А.С., Скорняков С.П., Шамыгин А.И. К вопросу о выборе припоя в конструкции мощных ограничителей напряжения // Электронная техника. – Сер. 2. – Полупроводниковые приборы. – Вып. 1 – 1986. – С. 97 – 101.

5. Андреев А.С., Скорняков С.П. Низковольтные ограничители напряжения // Электронная техника. – Сер.2. Полупроводниковые приборы. – 1986. – Вып.2. – С.42 – 47.

6. Андреев А.С., Скорняков С.П. Предельно допустимая импульсная мощность и импульсный ресурс работы ограничителей напряжения // Электронная техника. – Сер.2. Полупроводниковые приборы. – 1986. – Вып. 2 (244). – ч. 2. – С.44 – 46.

7. Скорняков С. П., Рахматов А. З. Ограничители напряжения // Электронная техника. – Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1991. – Вып. 2. – С. 53 – 61.

8. Рахматов А.З., Ташметов М.Ю., Скорняков С.П., Каримов А.В. Влияние нейтронного облучения на параметры кремниевых ограничителей напряжения и метод прогнозирования их радиационной стойкости // «ВАНТ» Вопросы атомной науки и техники. – Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2016. – Вып. 3. – С. 10 – 19.

9. Скорняков С.П. Низковольтные диффузионные р-п-переходы в технике полупроводниковых приборов // Электронная техника. – 2020. – Сер. 3. Микроэлектроника. – Вып. 3 (179). – С. 41-45.

10. Скорняков С.П. Туннельный пробой р-п-переходов с дефектами структуры // Электронная техника. – 2020. – Сер. 3. – Вып. 3 (179). – С. 5-7.

11. Скорняков С.П. Площадь р-п-перехода с туннельным пробоем как фактор конструирования полупроводниковых приборов // Электронная техника. – 2020. – Сер.2. Полупроводниковые приборы. – Вып. 4(259). – С. 25-30.

12. Скорняков С.П. Барьерные свойства остаточного оксида кремния при формировании низковольтных р-п-переходов диффузией мышьяка в сильнолегированном кремнии // Электронная техника. – 2021. – Сер.3. Микроэлектроника. – Вып. 1(181). – С. 18-20.

13. Скорняков С.П. Исследование диффузионных профилей распределения мышьяка и фосфора в сильнолегированном кремнии// Электронная техника. – 2021. – Сер. 3. Микроэлектроника. – Вып. 1 (181). – С. 27-30.

14. Скорняков С.П. Влияние низкотемпературных отжигов на параметры низковольтных диффузионных р-п-переходов // Электронная техника. – 2021. – Сер. 3. Микроэлектроника. – Вып. 1(181). – С. 31-34.

Авторские свидетельства и патенты на изобретения по теме диссертации:

15. Скорняков С.П., Кив А.Е., Мельник И.Г. [и др.] Способ получения омического контакта металл – полупроводник // А.с. на изобретение СССР № 470235, 1975. БИ № 17.

16. Махно Ю.Я., Скорняков С.П. Зондовое устройство // А.с. на изобретение СССР № 728227, 1980. БИ № 14.

17. Скорняков С.П. Полупроводниковый прибор // Патент СССР № 1031378, 1980. БИ № 34.

18. Скорняков С.П. Способ диффузии мышьяка в кремний // А.с. на изобретение СССР № 888763, 1981. БИ № 45.

19. Скорняков С.П. Способ изготовления слоистых полупроводниковых структур // Патент СССР № 1225423. 1984. БИ. № 24.

20. Скорняков С.П. Низковольтный ограничитель напряжения // Патент СССР № 1385947, 1986. БИ №16.

21. Скорняков С.П. Низковольтный термокомпенсированный стабилитрон и способ его изготовления // Патент РФ № 2162622, 2001. БИ № 17.

22. Скорняков С.П., Глухов А.В., Перов Г.В. [и др.] Способ управления и стабилизации скорости последиффузионного (диффузия мышьяка) охлаждения низковольтных (~6 В) кремниевых планарных структур прецизионных стабилитронов и устройство для его осуществления // Патент РФ № 2538027. 2014. БИ № 1.

23. Скорняков С.П., Глухов А.В., Перов Г.В. [и др.] Конструкция кварцевой ампулы для диффузии легирующих примесей в кремний (диффузии мышьяка) с встроенным приспособлением для управления скоростью последидиффузионного охлаждения кремниевых р-п-структур // Патент РФ № 2522786. 2014. БИ № 20.

24. Колычев С.Н., Скорняков С.П., Сеница А.В. [и др.] Способ пайки силовых полупроводниковых приборов // Патент РФ № 2641601. 2016. БИ № 2.

25. Скорняков С.П., Красный И.Б., Глухов А.В. [и др.] Способ изготовления кристаллов силовых полупроводниковых приборов // Патент РФ № 2674409. 2018. БИ № 34.

26. Скорняков С.П., Глухов А.В., Чищин В.Ф. [и др.] Способ повышения радиационной стойкости термокомпенсированных стабилитронов // Патент РФ № 2660317. 2018. БИ № 19.

27. Скорняков С.П., Глухов А.В., Глушков А.Е. [и др.] Способ изготовления ограничителей напряжения // Патент РФ № 2651624. 2018. БИ № 12.

В основных работах, опубликованных в других рецензируемых научных изданиях:

28. Кив А.Е., Мельник И.Г., Скорняков С.П. [и др.] Стимулированная адгезия алюминия на кремнии // Физика и техника полупроводников. – 1973. – Т. 7, № 3. – С. 617 – 619.

29. Скорняков С.П., Четырехзондовое устройство для измерения сопротивления полупроводников с повышенной точностью // Электронная техника. - Сер.8. Управление качеством и стандартизация. – 1980. – Вып. 6. – С.76 – 89.

30. Скорняков С.П., Алабугин И.М., Валяева Л.З. [и др.] Ограничители напряжения для электронных автоматических телефонных станций // Электронная промышленность. – 1991. – Вып.1. – С.105-106.

31. Морозова Н.К., Рахматов А.З., Скорняков С.П. Кремниевые ограничители напряжения – новый класс отечественных полупроводниковых приборов защиты электронных систем и компонентов от импульсных перегрузок // «Новые промышленные технологии – М. Изд. Минатомэнерго РФ. – 1993. – № 4 (2158). – С.27 – 31.

32. Рахматов А.З., Зайнабиддинов С.З., Скорняков С.П. Применение ограничителей напряжения // Сб. научных трудов молодых учёных и студентов. – Ташкент: Университет, 1988. – С.173 – 175.

33. Скорняков С.П., Рахматов А.З. Кремниевые ограничители напряжения – эффективные элементы защиты радиоэлектронных устройств // Компоненты и технологии. – 2008. – № 3. – С.70–74.
34. Павлов В.А., Рахматов А.З., Скорняков С.П. Условия обеспечения длительной надёжной работы ограничителей напряжения // Компоненты и технологии. Силовая электроника. – 2008. – № 4 – С.118-119.
35. Рахматов А.З., Скорняков С.П., Каримов А.В. [и др.] Физико-технологические аспекты создания низковольтных ограничителей напряжения на основе кремния // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА). – 2010. – № 5 – 6. – С.30 – 35.
36. Рахматов А.З., Скорняков С.П., Каримов А.В. [и др.] // Компоненты и технологии. Силовая электроника. – 2011. – №9. – С.54 – 55.
37. Рахматов А.З., Каримов А.В., Кахоров А.А., Скорняков С.П. Определение эффективности ограничения напряжения диодных структур // Компоненты и технологии. Силовая электроника. Элементы защиты – 2011. – № 4 – С.46-48.
38. Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Рахматов А.З., Скорняков С.П. [и др.] Исследование импульсных характеристик ограничителей напряжения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА). – 2011. – № 1 – 2. – С.15 – 19.
39. Рахматов А.З., Каримов А.В., Ёдгорова Д.М., Скорняков С.П. Приборные характеристики силовых диодов на основе кремниевых p^+n^+ , p^+n-n^+ и p^+p-n-n^+ - структур // Компоненты и технологии. Силовая электроника. – 2012. – № 4 – С.38 – 40.
40. Каримов А.В., Рахматов А.З., Ёдгорова Д.М., Скорняков С.П. Исследование импульсных характеристик ограничителей напряжения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА). Функциональная микро- и нанoeлектроника. – 2012. – № 3 – С.26 – 31.
41. Глухов А.В., Скорняков С.П., Перов Г.В. [и др.] Электронные компоненты высокой мощности для силовых систем защиты РЭА от импульсных перенапряжений // Силовая электроника. – 2012. – № 3. – С. 28-33.
42. Исюк В.И., Скорняков С.П. Радиационнoстойкие прецизионные термокомпенсированные стабилитроны – одна из ключевых научно-технических компетенций ОАО «НЗПП с ОКБ» // Альманах «Россия: Союз технологий». «Холдинг ОАО «Росэлектроника: по пути модернизации и высоких технологий». Изд. «Росэлектроника». – Изд. НО «Ассоциация «Лига содействия оборонным предприятиям», М. – 2013. – С. 338 – 343.

43. Рахматов А.З., Каримов А.В., Сандлер Л.С., Скорняков С. П. [и др.] Влияние гамма - и электронного облучения на ключевые параметры высокочастотных диффузионных диодов // Компоненты и технологии. Изд. «Файнстрит» – СПб. – 2013. – №10. – С.140 – 142.

44. Скорняков С.П., Сеница А. В., Глухов А.В. Некоторые особенности конструирования мощных выпрямительно-ограничительных диодов для сетевых защитных устройств // Силовая электроника. – 2015. – № 4. – С. 16 – 18.

45. Анохин А.С., Антипин Л.Г., Кузьмин А.С., Скорняков С.П. [и др.] Результаты измерения динамических параметров прецизионных стабилитронов // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. – М.: ФГУП «НПЦАП». – 2017. – №2. – С. 19 – 22.

46. Скорняков С. П., Глухов А.В., Чищин В.Ф. [и др.] Радиационная стойкость низковольтных термокомпенсированных стабилитронов // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. – М.: ФГУП «НПЦАП». – 2017. – № 4(42). – С.69 – 74.

47. *Karimov A.V., Rakhmatov A.Z., Skorniyakov S.P. et setr. On mechanism of radiative sensitivity of power diode direct voltage drop // Radioelectronics and Communication Systems. – New York.: Allerton Press, Inc. – 2017. – Vol.60. – Issue 6. – P. 272 – 274.*

48. Скорняков С.П., Чищин В.Ф., Глухов А.В. [и др.] Управление температурным коэффициентом и нелинейностью температурного коэффициента напряжения стабилизации прецизионных термокомпенсированных стабилитронов // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. – М.: ФГУП «НПЦАП». – 2020. – №1(51). – С. 45 – 54.

49. Скорняков С.П. Площадь *p-n*-перехода с туннельным пробоем как фактор конструирования полупроводниковых приборов // Электронная техника. – 2020. – Сер. 2. Полупроводниковые приборы – Вып. 4 (259). – С. 25-30.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс: (383)346-08-57.
формат 60x84 1/16, объем 2,5 п.л., тираж 120 экз.
Заказ № 295. Подписано в печать 23.09.2021 г.