

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НОВОСИБИРСКИЙ ЗАВОД ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ
ВОСТОК»



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

Диссертация на соискание учёной степени
доктора технических наук

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

Новосибирск – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
ГЛАВА 1 ФИЗИКО – ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ДИФФУЗИОННЫХ КРЕМНИЕВЫХ <i>P-N</i> -ПЕРЕХОДОВ С ТУННЕЛЬНЫМ ПРОБОЕМ	30
1.1 Физические аспекты проблемы получения диффузионных <i>p-n</i> -переходов с туннельным и смешанным механизмами пробоя	31
1.1.1 Формы пробоя <i>p-n</i> -переходов и области их действия.....	32
1.1.2 Физические модели низковольтных <i>p-n</i> -переходов	40
1.2 Технологические аспекты проблемы получения диффузионных кремниевых <i>p-n</i> -переходов с туннельным пробоем.....	43
1.2.1 Выбор легирующей примеси для формирования “резких” <i>p-n</i> -переходов....	43
1.2.2 Поиск эффективной диффузионной технологии получения низковольтных <i>p-n</i> -структур	47
1.2.2.1 Диффузия в окислительной и неокисляющей средах	49
1.2.2.2 Диффузия в эвакуированном реакторе	52
Выводы к главе 1	54
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ <i>P-N</i> -СТРУКТУР	57
2.1 Оценка граничных условий проведения экспериментов	57
2.2 Исследование процессов высококонцентрационной диффузии мышьяка	60
2.3 Поиск эффективного источника диффузии мышьяка	63
2.4 Дефекты на планарных диффузионных <i>p-n</i> -структурах	76
2.5 Барьерные свойства остаточного оксида кремния при формировании <i>p-n</i> -переходов диффузией мышьяка.....	88
2.6 Исследование диффузионных профилей распределения мышьяка в кремнии	91

2.7 Исследование электрофизических характеристик диффузионных НВ <i>p-n</i> -структур.....	99
2.7.1 Зависимость напряжения пробоя НВ диффузионных <i>p-n</i> -переходов от условий диффузии.....	102
2.7.2 Зависимость глубины залегания НВ диффузионных <i>p-n</i> -переходов от условий диффузии.....	103
2.7.3 Влияние низкотемпературных отжигов на параметры низковольтных диффузионных <i>p-n</i> -переходов.....	103
2.7.4 Исследование дифференциальных сопротивлений низковольтных диффузионных <i>p-n</i> -структур.....	108
2.7.5 Зависимость напряжения пробоя низковольтных диффузионных <i>p-n</i> -структур от площади <i>p-n</i> -перехода.....	115
2.8 К понятию “резкости” <i>p-n</i> -перехода	119
2.9 Туннельный пробой низковольтных <i>p-n</i> -переходов с дефектами структуры кремния.....	125
Выводы к главе 2	127
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ПЛАНАРНО-ДИФФУЗИОННЫХ НИЗКОВОЛЬТНЫХ СТАБИЛИТРОНОВ	130
3.1 Поиск и анализ информации о зарубежных и отечественных технологиях изготовления низковольтных стабилитронов	130
3.2 Разработка планарно-диффузионной технологии изготовления низковольтных стабилитронов.....	138
3.3 Разработка, исследование и внедрение планарно-диффузионных низковольтных стабилитронов в серийное производство	139
Выводы к главе 3	144

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННЫХ И ПРЕЦИЗИОННЫХ ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННЫХ СТАБИЛИТРОНОВ.....	145
4.1 Принцип термокомпенсации низковольтных стабилитронов.....	145
4.1.1 Температурная зависимость напряжения пробоя основного <i>p-n</i> -перехода.	149
4.1.2 Температурная зависимость прямого падения напряжения на компенсирующем <i>p-n</i> -переходе.....	149
4.1.3 Температурная зависимость напряжения стабилизации термокомпенсированного стабилитрона	150
4.2 Разработка, исследование и производство термокомпенсированных стабилитронов КС405А	151
4.2.1 Феноменологическая методика расчёта термокомпенсированного стабилитрона.....	152
4.2.2 Конструкция и технология изготовления кристалла стабилитронов КС405А	158
4.2.3 Сравнение стабилитронов КС405А с зарубежными аналогами – стабилитронами 1N4567	160
4.3 Разработка, исследование и производство прецизионных термокомпенсированных стабилитронов 2С198А ÷ 2С198К.....	162
Выводы к главе 4.....	164
ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ УЛЬТРА-ПРЕЦИЗИОННЫХ ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННЫХ СТАБИЛИТРОНОВ 2СП101А ÷ 2СП501Д .	166
5.1 Феноменологическая методика расчёта конструкционных и технологических параметров ультра-прецизионных термокомпенсированных стабилитронов.....	168
5.1.1 Нелинейность температурной зависимости напряжения стабилизации термокомпенсированного стабилитрона	171

5.1.2 Алгоритм расчёта конструкционно – технологических параметров ультра-прецизионных термокомпенсированных стабилитронов	173
5.2 Разработка и исследование ультра-прецизионных термокомпенсированных стабилитронов класса точности 0,0002%	174
5.2.1 Стойкость прецизионных термокомпенсированных стабилитронов к воздействию внешних факторов.....	177
5.2.2 Метрологическое обеспечение разработки, производства и испытания ультра-прецизионных термокомпенсированных стабилитронов	186
5.2.3 Внедрение ультра-прецизионных термокомпенсированных стабилитронов в серийное производство	189
Выводы к главе 5	191
ГЛАВА 6 РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО НИЗКОВОЛЬТНЫХ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ	193
6.1 Кремниевые ограничители напряжения – новый класс приборов защиты в отечественной электронике.....	193
6.2 Физические аспекты работы ограничителей напряжения	198
6.3 Принципы конструирования и технологии изготовления ограничителей напряжения	201
6.4 Теплофизический анализ конструкции ограничителей напряжения.....	212
6.5 Особенности технологии изготовления низковольтных ограничителей напряжения	218
6.6 Исследование и внедрение низковольтных ограничителей напряжения в производство.....	224
6.7 Преобразователи напряжения на основе планарных <i>p-n</i> -переходов с туннельным пробоем	225
Выводы к главе 6	230
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	233

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	237
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	240
Приложение А - АКТ внедрения в серийное производство АО «НЗПП с ОКБ, г. Новосибирск, результатов диссертации.....	256
Приложение Б - АКТ внедрения в серийное производство АО «FOTON», г. Ташкент, результатов диссертации	259
Приложение В –Авторские свидетельства и патенты на изобретения СССР и РФ по теме диссертации.....	261
Приложение Г - Зондовое устройство для измерения удельного и поверхностного сопротивлений полупроводников с повышенной точностью	271
Приложение Д - Протокол сравнительных испытаний 4-х зондовых головок производства института АО «ГИРЕДМЕТ» и завода АО «НЗПП с ОКБ»	275

ВВЕДЕНИЕ

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). В частности, основной объём производства на специализированном предприятии АО «НЗПП Восток» (ранее – АО «НЗПП с ОКБ») представляют именно низковольтные типономиналы 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 недостаток полупроводниковых приборов, 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.

Однако сплавная технология не обеспечивала приемлемой воспроизводимости электрических характеристик p - n -переходов от процесса к процессу и их распределения по площади кремниевых подложек, т.е. удовлетворительного уровня технологичности. Сплавные стабилитроны обладали значительными габаритами и весом, что также существенно снижало тактико-технические характеристики РЭУ, в состав которых они входили.

Охрана сплавного p - n -перехода, выходящего на верхнюю плоскость кристалла кремния, осуществлялась либо защитой полимерным компаундом, либо с помощью предварительно сформированного в кремниевой пластине при температуре порядка 1350°C относительно высоковольтного диффузионного p - n -перехода. Можно указать на ещё один вариант сплавной технологии изготовления НВ p - n -структур, включающий элемент их планаризации. В этом случае сплавление Al в Si производится не из навески, а из напылённого слоя алюминия. Но и этот вариант не был свободен от названных недостатков.

Сплавные p - n -структуры отличались повышенными токами утечки в микроамперном диапазоне токов стабилизации и неприемлемым разбросом электрических параметров по пластине. Причины – низкое качество диэлектрической защиты сплавного p - n -перехода в месте его выхода на поверхность кремния и остаточные механические напряжения в рекристаллизованной зоне сплава Al–Si, следствием чего может быть образование в слое силумина микротрещин и деградация p - n -перехода в процессе работы стабилитрона в условиях вибрации и термоударов [1]. Вследствие указанных причин не допускалось применение полупроводниковых приборов на основе сплавных p - n -структур в режиме микроамперных токов стабилизации, а также – в ждущем режиме.

На рисунке В.1 в качестве примера представлены сравнительные вольт-амперные характеристики образцов относительно высоковольтных ($U_{cm} = 7,5B$) стабилитронов типа Д814А, изготовленных по сплавной и планарной технологиям.

Относительно мягкие ВАХ сплавных стабилитронов Д814А в области микроамперных токов свидетельствуют о недостаточном качестве диэлектрической защиты *p-n*-структур, получаемых сплавлением Al в кремний.

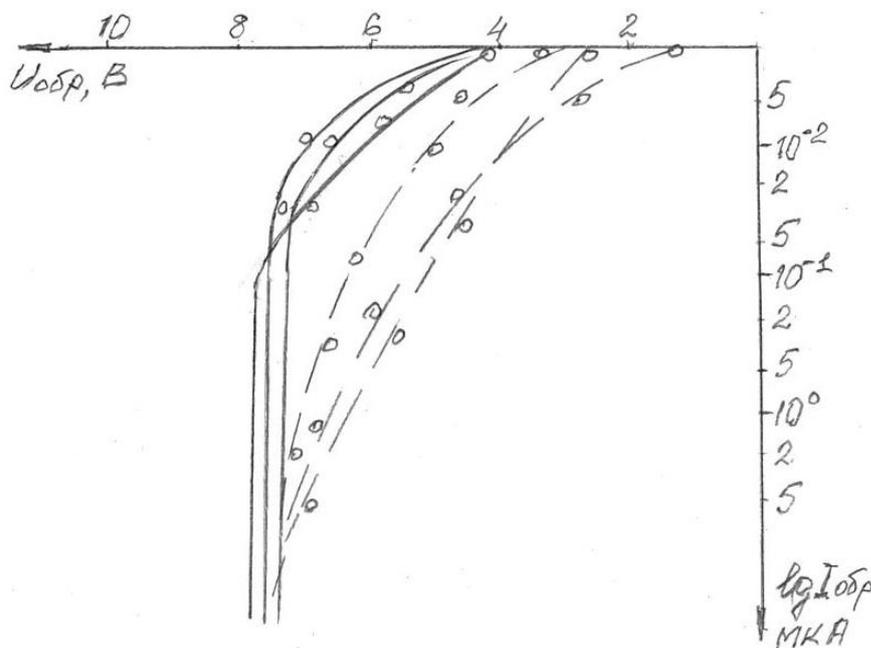


Рисунок В.1 – Вольт-амперные характеристики стабилитронов Д814А, изготовленных по сплавной (пунктирная линия) и планарной (непрерывная линия) технологиям

Первое поколение отечественных как низковольтных, так и высоковольтных кремниевых стабилитронов базировалось на технологии сплавления алюминия в кремний. Со времени создания отечественных планарных технологий диодных матриц и интегральных микросхем на основе способов диффузии и эпитаксии производство высоковольтных стабилитронов также переведено на прогрессивную планарно-диффузионную технологию.

Создание низковольтных *p-n*-структур по планарной технологии на достаточной для конструирования стабилитронов глубине залегания *p-n*-перехода, – более 3 мкм, не уступающих “резким” сплавным *p-n*-переходам по основным характеристическим параметрам, но превосходящих по надёжности, потребовало значительных, длительных усилий нескольких ведущих предприятий отечественной электронной промышленности. Однако проблема получения НВ

планарно-диффузионных *p-n*-структур и создания на этой основе отечественных низковольтных ППП была решена только в результате проведения настоящей работы.

Суть проблемы создания НВ *p-n*-структур по планарно-диффузионной технологии заключается в том, что существовавшими методами диффузионной технологии, в отличие от технологии сплавления алюминия в кремний, практически невозможно было создать работоспособный, “резкий” НВ диффузионный *p-n*-переход с градиентом концентрации легирующей примеси на уровне $\sim 10^{24}$ см⁻⁴, т.е. с туннельным механизмом пробоя, и на достаточной для конструирования низковольтных полупроводниковых приборов (НВ ППП) глубине (> 3 мкм). Это относится как к наиболее востребованным из них – источникам опорного напряжения стабилитронам (НВС), так и, в первую очередь, к созданным позднее отечественным эффективным приборам защиты электронных устройств с низкими уровнями питания от разрушительных электро-магнитных импульсов (ЭМИ) различной природы – силовым ППП низковольтным ограничителям напряжения (НВ ОН).

Анализ результатов исследований предшественников – разработчиков полупроводниковых приборов АО «САПФИР», АО «НЗПП с ОКБ», АО «ПУЛЬСАР» в области создания технологий изготовления низковольтных ППП на основе прогрессивных способов диффузии, эпитаксии и ионного легирования и поиска ими способов решения проблемы замещения сплавной технологии планарно-диффузионной технологией получения НВ кремниевых *p-n*-структур показал, что решение проблемы необходимо искать в нетрадиционной области поля действий.

В настоящей работе представлены авторские результаты решения проблемы получения НВ диффузионных *p-n*-структур, не уступающих по основным электрическим параметрам сплавным НВ *p-n*-структурам, и разработки на основе таких *p-n*-структур НВ стабилитронов (НВС), низковольтных силовых ППП – ограничителей напряжения (НВ ОН) и НВ термокомпенсированных стабилитронов (НВ ТКС).

Представлены результаты разработки промышленной технологии изготовления планарно-диффузионных низковольтных *p-n*-структур с туннельным и смешанным механизмами пробоя по способу высококонцентрационной диффузии мышьяка из неограниченного источника в сильно легированный кремний в условиях эвакуированного реактора (кварцевой ампулы) и разработки на этой основе промышленных технологий изготовления планарных НВ стабилитронов, термокомпенсированных и прецизионных термокомпенсированных стабилитронов и НВ ограничителей напряжения.

Достигнутыми в настоящей работе результатами было положено начало созданию планарной технологии отечественных НВ ППП. Можно отметить также, что создание планарной технологии НВ ППП – стабилитронов и ограничителей напряжения не только обеспечило АО «НЗПП с ОКБ» монопольное положение в этой области полупроводникового приборостроения, но и в значительной степени сохранило производство в известный период катастрофических потрясений отечественной промышленности в целом и электронной промышленности в частности. В настоящее время именно по этой технологии производится значительная часть полупроводниковых приборов АО «НЗПП с ОКБ».

Представленные в диссертации результаты охватывают полный цикл работ по достижению поставленной цели, включающий:

- сбор, анализ и систематизацию информации по проблемам в области разработки и производства НВ ППП и существующих технологий получения НВ *p-n*-структур;
- разработку технологии получения НВ планарных *p-n*-структур с туннельным и смешанным механизмами пробоя на основе идеи высококонцентрационной диффузии мышьяка в сильнолегированный кремний из неограниченного источника в условиях эвакуированной ампулы, исследования диффузионных НВ *p-n*-структур и конструктивно-технологических факторов, определяющих их электрофизические параметры;

- создание способов управления с помощью этих факторов параметрами НВ диффузионных *p-n*-структур;
- разработку на основе таких структур высоконадёжных НВ стабилизаторов, в т.ч. термокомпенсированных и прецизионных термокомпенсированных, и НВ ограничителей напряжения;
- внедрение разработанных серий полупроводниковых приборов в серийное производство и насыщение ими отечественного гражданского и, в первую очередь, оборонного рынка электронных компонентов.

Целью диссертационной работы были, в порядке замещения сплавной технологии изготовления низковольтных *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 стабилизаторов, в т.ч. НВ ТКС, и НВ ОН, разработка и внедрение в серийное производство планарно-диффузионных НВ стабилизаторов, термокомпенсированных стабилизаторов и ограничителей напряжения.

Для достижения поставленной цели 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 вплавлением Al в Si, высококонцентрационной диффузией As из неограниченного источника в эвакуированном 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 отжиги;

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_k , R_e), 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 стабилитронов 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 $U_{ст}$ 5,1 В 9,1 В при $I_{ст} = 50$ мкА с разбросом напряжения стабилизации $\pm 2\%$ и обратным током менее 50 нА;

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

4) серия прецизионных НВ термокомпенсированных стабилитронов 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 стабилитронов 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 стабилитроны с напряжением стабилизации \sim 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 $As \geq 10^{24} \text{см}^{-4}$, низковольтных планарных *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. Феноменологическая методика расчёта конструкции и технологических режимов изготовления *p-n*-структур прецизионных термокомпенсированных стабилитронов.

4. 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, и совокупностью разработанной

базовой технологии получения низковольтных диффузионных *p-n*-структур и промышленных технологий разработки и внедрения в серийное производство массива низковольтных полупроводниковых приборов – стабилитронов, термокомпенсированных стабилитронов и ограничителей напряжения.

Исследования и измерения электрических параметров образцов НВ *p-n*-структур и приборов проводились с помощью высокоточных измерительных установок, включающих современные цифровые вольтметры и источники тока. При измерении параметров прецизионных термокомпенсированных стабилитронов использовались мера напряжения К6-10МН класса точности 0,0004 % (0,4 *ppm*) разработки предприятия АО «РИТМ», г. Краснодар, и 10-ти вольтовая мера напряжения на основе элементов Джозефсона МН4-21 класса точности 0,00001 % (0,1 *ppm*) разработки НПО «КВАРЦ», г. Н.Новгород, со статусом практически вторичного эталона Вольта, аттестованная сличением с первичным эталоном Вольта в головном институте метрологии ВНИИМ, г. Санкт-Петербург.

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, основные из них документально представлены в Приложениях А, Б, В, Г, Д.

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

Автор был в 1989, 1990 годах 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 эвакуированном 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 12 национальных и международных конференциях: на семинаре “Влияние излучений на диффузию и фазовые переходы в твёрдых телах”, г. Кривой Рог, 1972 г.; на XX, XXI обл. конф., посвящённых Дню Радио. Секция “Радиоэлектроника”. – Новосибирск, 1977 г., 1978 г.; на XXVII обл. конф., посвящённой Дню Советской Науки и Дню Радио. Секция “Радиоэлектроника”. ГПНТБ СО РАН СССР, г. Новосибирск, 1984 г.; на н.-т. конференции “Элементная база космических систем”, г.Сочи, 2005 г.; на V Респ. научной конференции “Рост, свойства и применение кристаллов”, г.Андижан, 2008 г.; на Совещаниях Ассоциации заказчиков и потребителей унифицированных изделий электронной техники «Фонд УНИЭТ», Москва, 2012 г., 2013 г.; на международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», АН Руз, НПО «Физика Солнце», Ташкент, 2013 г.; на XVI международной конференции молодых специалистов по микро / нанотехнологиям и электронным приборам, г.Новосибирск, 2014 г.; на международной конференции “Фундаментальные и прикладные вопросы физики”, АН РУз, НПО «Физика – Солнце, г. Ташкент, 2015 г.; на международной конференции “Фундаментальные и прикладные вопросы физики”, АН РУз, НПО «Физика – Солнце, Ташкент, 2017 г.

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 – личный вклад 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 выполненных на основе результатов настоящей работы, из них в 13 работах автор был главным конструктором / научным руководителем.

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.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во ВВЕДЕНИИ дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертационной работы, описание Проблемы, которую необходимо было решить, 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 ГЛАВЕ 1 представлены результаты анализа литературных данных, характеризующие низковольтные *p-n*-переходы как с точки зрения физики присущих им механизмов пробоя, так и технологии изготовления на основе таких *p-n*-переходов “резких” НВ диффузионных *p-n*-структур, на которые следует ориентироваться в поиске диффузионного способа формирования *p-n*-структур, замещающего способ получения *p-n*-структур сплавлением Al в Si, разработке технологии получения планарно-диффузионных *p-n*-структур, исследовании их характеристик и разработке на этой основе планарных НВ стабилитронов, НВ термокомпенсированных стабилитронов, НВ ограничителей напряжения.

В качестве ориентиров этого рода предложены специфические величины и характер поведения таких электрических параметров НВ *p-n*-переходов с туннельным и смешанным механизмами пробоя, как градиент концентрации легирующей примеси в *p-n*-переходе ($\Delta N_{p-n} > 10^{24} \text{см}^{-4}$), характер зависимости

дифференциального сопротивления от напряжения пробоя p - n -перехода, температурный коэффициент напряжения пробоя HV p - n -переходов, эффективная концентрация базовой и диффундирующей примесей в p - n -переходе.

На основании таких критериев отбора, как тетраэдрический радиус, высокая предельная растворимость в кремнии и коэффициент диффузии, в качестве наиболее эффективной легирующей примеси относительно таких традиционных легирующих примесей как фосфор, сурьма (доноры), бор (акцептор), проведено обоснование выбора мышьяка в качестве основной легирующей примеси для формирования “резких” диффузионных p - n -переходов.

В качестве наиболее эффективного способа диффузии легирующей примеси для формирования “резких” диффузионных p - n -переходов обоснован выбор способа безкислородной высококонцентрационной диффузии As в эвакуированном реакторе (кварцевой ампуле) из неограниченного источника. В качестве источника диффузии – металлоидный мышьяк в кристаллическом виде вместе с навеской порошка сильнолегированного бором кремния (КДБ0,001).

В ГЛАВЕ 2 представлены результаты разработки технологии и исследования низковольтных диффузионных p - n -структур, полученных на основе высококонцентрационного процесса диффузии As в эвакуированном реакторе из неограниченного источника.

На основании расчёта, основанного на приближённом значении критической величины напряжённости поля в p - n -переходе, начиная с которой квантовая вероятность туннелирования становится достаточно существенной ($\mathcal{E}_m \approx 10^6$ В/см), для проведения экспериментов по получению и исследованию HV диффузионных p - n -переходов выбран кремний марки КДБ с удельными сопротивлениями в диапазоне (0,001 – 0,1) Ом·см.

Исследован сопутствующий высококонцентрационной диффузии As отрицательный эффект образования на поверхности легируемых кремниевых пластин различного рода структурных дефектов, предложены способы предотвращения их образования.

Исследовано влияние на параметры НВ диффузионных p-n-переходов сверхтонких остаточных слоёв оксида кремния на поверхности легируемых пластин. Показано, что в условиях диффузии As в эвакуированной ампуле величина $SiO_{2ост.}$ не должна превышать (15 – 20) Å. Мышьяк не диффундирует в кремний, если толщина $SiO_{2ост.}$ превышает 50 Å. В промежуточной области толщин $SiO_{2ост.}$ нарушается базовое условие неограниченности источника легирующей примеси.

Методами дифференциальной проводимости и нейтронно-активационным исследованием распределения As в p-n-структурах, получаемых высококонцентрационной диффузией As в эвакуированной ампуле. Выявлено, что As в диффузионном слое находится как в активной (ионизированные атомы), так и пассивной (нейтральные метастабильные образования – кластеры) формах. Это послужило основанием для создания способа управления и тонкой корректировки электрических параметров НВ диффузионных p-n-структурах с помощью низкотемпературных отжигов в диапазоне температур (400-950)°С.

Полученные абсолютно регулярные экспериментальные кривые зависимости напряжений пробоя p-n-переходов с преобладающим туннельным механизмом пробоя от площади p-n-перехода свидетельствуют о том, что туннелирование носителей происходит равномерно по всей площади p-n-перехода, т.е. не зависит от структурных дефектов сильнолегированного кремния в области p-n-перехода, что ещё раз подтверждает основные положения теории туннельного пробоя.

Представлены результаты исследований зависимости основных характеристических электрофизических параметров экспериментальных образцов НВ диффузионных p-n-переходов: напряжения пробоя ($U_{проб}$), дифференциального сопротивления (r_d), обратного тока ($I_{обр}$), глубины залегания p-n-перехода (x_j), – от удельного сопротивления (концентрации легирующей примеси в базе, N_b) подложки (кремний КДБ0,001...КДБ0,1), тока стабилизации ($I_{см}$), от режимов их изготовления (температура T , время t), от площади p-n-перехода S_{p-n} , от воздействия низкотемпературных (НТ) отжигов в диапазоне “недиффузионных” температур (400-950)°С. На основе полученных результатов предложены способы

управления, тонкой корректировки, достижения воспроизводимости электрических параметров НВ диффузионных p - n -структур от процесса к процессу и равномерного их распределения по легируемой пластине.

На основании теоретических представлений об эффективной концентрации легирующих примесей в НВ p - n -переходе ($N_{эф}$) и экспериментальных данных по зависимости напряжения пробоя диффузионных НВ p - n -переходов от удельного сопротивления $U_{проб}(\rho_v)$, получено доказательство того, что p - n -переходы, полученные высококонцентрационной диффузией As, также следует относить к “резким” p - n -переходам с электрическими характеристиками, подобными характеристикам НВ p - n -переходов, получаемых по технологии сплавления в кремний алюминия.

Представлены результаты исследования основных электрофизических параметров НВ диффузионных p - n -переходов в зависимости от технологических режимов их изготовления, электрофизических параметров кремниевой подложки и конструктивных характеристик – площади и глубины залегания p - n -переходов. Показано, что значения основных электрических параметров p - n -переходов ($U_{проб}$, r_d), полученных способом высококонцентрационной диффузии As в сильнолегируемый кремний, для исследованного НВ диапазона напряжений пробоя $U_{проб}$ (3-15) В практически совпадают с аналогичными характеристиками НВ сплавных p - n -переходов, что предоставляет возможность полного замещения сплавной технологии изготовления НВ p - n -структур. Это позволило не просто заместить плохо воспроизводимую, трудоёмкую технологию сплавления Al в сильнолегируемый кремний n -типа проводимости планарно-диффузионной технологией, резко повысить выход годных НВ ППП, но и улучшить принципиальным образом их качество и надёжность.

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 возможности получения глубоких p - n -структур для силовых полупроводниковых приборов – НВ ограничителей напряжения.

Показано, что результаты исследования свойств и характеристик НВ планарных диффузионных *p-n*-структур, полученных по выбранному способу, и создания на этой основе базовой технологии получения НВ диффузионных *p-n*-структур, удовлетворяющих требованиям надёжности современных ППП, обеспечивают создание нового направления в технологии планарных НВ стабилитронов, в т.ч. термокомпенсированных стабилитронов, и НВ ограничителей напряжения.

В ГЛАВЕ 3 приведены результаты разработки, исследования и внедрения в серийное производство на основе технологии высококонцентрационной диффузии Аs и пакета экспериментальных данных по исследованию НВ диффузионных *p-n*-структур НВ радиационнотойких НВ стабилитронов:

- серии НВС общего и специального применения в корпусах для навесного монтажа с напряжениями стабилизации от 2,4 В до 6,2 В;
- массива НВС (47 типов) в корпусах для поверхностного монтажа (SMD) с напряжениями стабилизации от 2.0 до 6,2 В;
- прецизионных низковольтных стабилитронов с низким разбросом напряжения стабилизации 2С151А, 2С235А с U_{cm} 5,1 В $\pm 2\%$, 9,1 В $\pm 2\%$ при $I_{cm} = 50$ мкА с обратным током < 50 нА.

Впервые в практике конструирования стабилитронов для целенаправленного получения заданных (по параметру напряжение стабилизации U_{cm}) типономиналов стабилитронов применён, помимо типовых управляющих факторов – удельное сопротивление подложки (ρ_v Ом·см), режим диффузии ($T^\circ\text{C}$, t ч.), фактор площади *p-n*-перехода (S_{p-n} см²).

Впервые в практике конструирования стабилитронов для целенаправленного получения прецизионных по параметру U_{cm} типономиналов приборов применены НТ отжиги НВ *p-n*-структур в пластинах и НВ стабилитронов в стеклянных корпусах при температуре 500°C.

В ГЛАВЕ 4 приведены результаты проектирования, исследования и внедрения в серийное производство термокомпенсированных стабилитронов

общего и специального применения с напряжениями стабилизации 6,2 В, 6,3 В при токе стабилизации 0,5 мА:

- серия НВ термокомпенсированных стабилитронов (НВ ТКС) общего применения КС405А, КС405Б с $U_{ст}$ 6,2 В \pm 5 % при токе 0,5 мА;
- серия прецизионных НВ ТКС специального применения 2С198А÷2С198К с $U_{ст}$ 6,3 В \pm 1% при токе 0,5 мА класса точности 0,01 %.

Приведён анализ принципа и условий термокомпенсации НВ стабилитронов, разработана феноменологическая методика и проведён расчёт конструкции НВ термокомпенсированного стабилитрона с напряжением стабилизации на уровне 6,2 В. На основе результатов разработки и исследования НВ диффузионных *p-n*-структур, получаемых по способу высококонцентрационной диффузии *As*, разработана промышленная технология изготовления НВ термокомпенсированных стабилитронов с напряжениями стабилизации 6,2В, 6,3 В при токе стабилизации 0,5 мА.

Представлены результаты сравнительных исследований функциональных параметров разработанных термокомпенсированных стабилитронов КС405А [104] и их зарубежных аналогов – стабилитронов 1N4567, – по данным из DATA SHEET [126] и фактическим. Показано, что стабилитроны КС405А превосходят зарубежные аналоги – стабилитроны 1N4567 по устойчивости к воздействию кратковременных повышенных постоянных токов.

В ГЛАВЕ 5 приведены результаты разработки, исследования и внедрения в серийное производство серии ультра-прецизионных термокомпенсированных стабилитронов, в т.ч. аттестуемых (УАПС), 2СП101А ÷ 2СП501Д с напряжением стабилизации 6,1 В \pm 1 % при токе 7,5 мА классов точности до 0,0002% (2 ppm). Промышленная технология УАПС базируется на результатах разработки технологии получения НВ диффузионных *p-n*-структур с туннельным и смешанным механизмами пробоя по способу высококонцентрационной диффузии *As* и разработки НВ термокомпенсированных стабилитронов серии 2С198А÷2С198К.

Представлены результаты создания феноменологической методики расчёта прецизионных термокомпенсированных стабилитронов на основе полученных экспериментальных зависимостей характеристических электрических, конструкционных и технологических параметров от удельного сопротивления подложки, плотности тока через p - n -переход и технологических режимов изготовления НВ p - n -структур, позволяющая определить параметры конструкции и технологические режимы изготовления прецизионных ПТКС.

В качестве отправной позиции алгоритма расчёта конструкции ПТКС используется полученная впервые экспериментальным путём зависимость нелинейности температурной зависимости напряжения стабилизации термокомпенсированного стабилитрона ($\Delta U_{л.ст.}$, мкВ) от напряжения пробоя ($U_{проб.о}$) и плотности ($J_{p-n.о}$) тока через основной p - n -переход ПТКС.

Теоретически и экспериментальным способом 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 ($U_{пр.к.}$).

Экспериментальным путём показано, что достаточно эффективное повышение радиационной стойкости двухкристальных низковольтных термокомпенсированных стабилитронов достигается за счёт легирования золотом кристалла с компенсирующим p - n -переходом.

Для метрологического обеспечения разработки, исследований и производства аттестуемых термокомпенсированных стабилитронов повышенной точности (УАПС) создан специализированный прецизионный метрологический комплекс на основе 10-ти вольтовой меры напряжения Н4-21 класса точности 0,1 ppm в специальном экранированном, термостатированном помещении с автономным питанием и электрометрическим заземлением.

В ГЛАВЕ 6 приведены результаты разработки, исследования и внедрения в серийное производство ряда силовых приборов защиты – низковольтных ограничителей напряжения:

- серия НВ ОН с напряжениями пробоя 3,9; 6,2; 8,2; 9,1; 15 Вольт в корпусах для навесного монтажа;
- массив НВ ОН (22 типа) в корпусах для поверхностного монтажа (SMD) с напряжениями пробоя от 3.9 до 15 В.

Исследованы физические аспекты работы силового полупроводникового прибора – ограничителя напряжения, определяющие эффективность его функционирования и надёжность.

На основании результатов исследований разработаны основные принципы конструирования и промышленные технологии изготовления ограничителей напряжения, в т.ч. – низковольтных на основе *p-n*-структур с туннельным и смешанным механизмами пробоя.

Предложен механизм отказа ограничителей напряжения, связанный с генерацией тепловых волн в 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.

Показано, что НВ ограничители напряжения с $U_{проб.} 3,9$ В (2С414А), 6,2 В (2С408А), изготовленные по разработанной технологии диффузии As, отличаются от зарубежных аналогов GHV-6, GHV-8 ф. G.S.I., Inc. значительным функциональным превосходством.

Предложено выявленный экспериментальным путём эффект существенной нелинейной зависимости напряжения пробоя ($U_{проб}$) *p-n*-переходов с туннельным механизмом пробоя от величины их площади (S_{p-n}) применить для создания нового типа полупроводниковых приборов – преобразователей напряжения с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

При конструировании и разработке технологий изготовления НВС, НВ ТКС, НВ ОН, помимо практикуемых конструкционных и технологических факторов – удельное сопротивление кремниевой подложки (ρ_v) и режимы диффузии, температура и время (T_d, t_d), использовались также такие результаты исследования НВ диффузионных $p-n$ -структур как зависимость напряжения пробоя от площади $p-n$ -перехода для $p-n$ -переходов с туннельным механизмом пробоя $U_{проб.т.}(S_{p-n})$ и НТ отжига пластин с кристаллами и кристаллов в стеклянных корпусах типа КД-2 в диапазоне температур (400-950)°С для управления и тонкой корректировки параметра $U_{проб}$ как в сторону увеличения, так и снижения его величины.

ГЛАВА 1 ФИЗИКО – ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ДИФФУЗИОННЫХ КРЕМНИЕВЫХ *p-n*-ПЕРЕХОДОВ С ТУННЕЛЬНЫМ ПРОБОЕМ

В отличие от планарно-диффузионной технологии изготовления высоковольтных *p-n*-структур, заместившей технологию сплавления Al в Si, проблема получения низковольтных кремниевых *p-n*-структур по планарно-диффузионной технологии представляет собой гораздо более многофакторную задачу, что определяется различием механизмов пробоя высоковольтных и низковольтных *p-n*-переходов и физико-химическими аспектами способов / процессов диффузии легирующих примесей в сильнолегированный кремний со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Высоковольтным *p-n*-переходам присущ лавинный, низковольтным *p-n*-переходам – туннельный и смешанный механизмы пробоя. Лавинный пробой развивается по механизму ударной ионизации и образования “лавины носителей заряда” в протяжённой области пространственного заряда *p-n*-перехода при относительно низкой напряжённости электрического поля. Туннельный пробой – по механизму туннелирования носителей заряда сквозь узкую область пространственного заряда при достижении величины электрического поля некоторого критического значения. Смешанный механизм пробоя представляет собой суперпозицию туннельного и лавинного механизмов пробоя. Причём, туннелирование носителей заряда служит в данном случае источником появления первичных носителей, способствующих развитию лавинного процесса.

Физико-химические аспекты способов / процессов диффузии легирующих примесей в сильнолегированный кремний определяются такими физическими свойствами легирующих примесей как тетраэдрический радиус и коэффициент диффузии, химические – диффузией в открытом или закрытом объёме, из ограниченного или неограниченного источников.

На рисунке 1.1 представлена картина распределения *p-n*-переходов с напряжениями пробоя, начиная от *p-n*-переходов с достаточно высоким

значениями $U_{\text{проб}}$, вплоть до p - n -переходов с напряжениями пробоя с величиной в единицы Вольта.

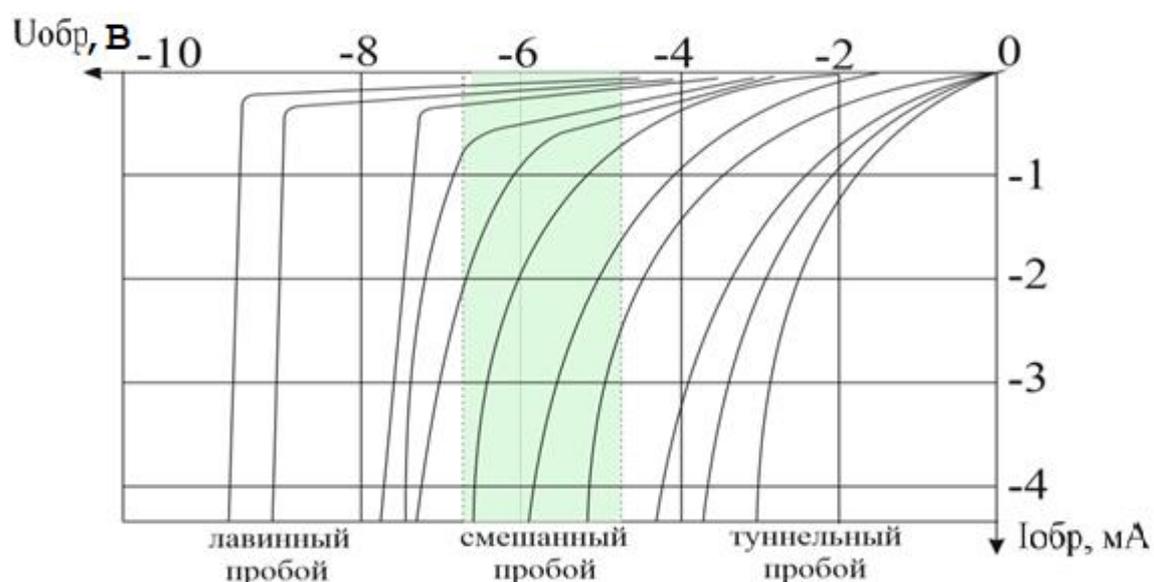


Рисунок 1.1 – Области действия механизмов пробоя низковольтных кремниевых p - n -структур. Тонированная область – область совместного действия лавинного и туннельного механизмов пробоя (смешанный пробой)

1.1 Физические аспекты проблемы получения диффузионных p - n -переходов с туннельным и смешанным механизмами пробоя

В это же время, в связи с интенсивным развитием электронной промышленности, в частности, с резкой потребностью в производстве выпрямительных диодов и источников опорного напряжения – стабилитронов, создавалась отечественная наука прикладной физики кремниевых p - n -переходов [2-4].

Ниже приводится анализ основных положений теории пробоя кремниевых p - n -переходов и связанных с этим эффектов прикладного характера, на основе которых создавалась промышленность таких дискретных полупроводниковых приборов как выпрямительные диоды, стабилитроны и, позже, – кремниевые ограничители напряжения.

По-существу, выпрямительные диоды, стабилитроны и ограничители напряжения – один и тот же дискретный полупроводниковый прибор,

“работающий” на одном p - n -переходе, но с разным предназначением, разной системой (нормированием) электрических параметров, что отражается на их отличии, в основном конструкционного характера, друг от друга.

1.1.1 Формы пробоя p - n -переходов и области их действия

Электрические параметры и вид обратной ветви ВАХ НВ p - n -переходов определяются присущими им механизмами пробоя. В общем случае различают три вида электрического пробоя p - n -переходов: лавинный, туннельный, смешанный – туннельно-лавинный [5-7].

Называют также и поверхностный пробой, связанный с качеством диэлектрической защиты p - n -перехода в месте его выхода на поверхность полупроводника, состоянием поверхности и свойствами полупроводника вблизи поверхности. Вследствие возможного загрязнения и наличия на поверхности заряженных частиц на участках p - n -перехода, выходящих на поверхность кремния, имеется вероятность появления проводящих плёнок, каналов проводимости для токов утечки. Для уменьшения токов утечки принимают специальные конструкционные и технологические меры.

Лавинный пробой происходит по механизму ударной ионизации, локализуется в точечных участках p - n -перехода и носит микроплазменный характер. Туннельный – характеризуется квантовомеханическим туннелированием носителей заряда сквозь узкую $\sim(100\div 700)$ Å запрещённую зону p - n -перехода с напряжённостью электрического поля более $\sim 3 \cdot 10^5$ В/см и происходит равномерно по всей площади p - n -перехода [5, 6]. И тот и другой виды пробоя носят обратимый характер, что и является условием долговечности ППП – стабилитронов и ограничителей напряжения, в основе конструкции которых лежит p - n -переход.

В кремниевых p - n -переходах с напряжением пробоя меньше, чем $\sim 4E_g/q$ (E_g – ширина запрещённой зоны p - n -перехода) реализуется туннельный механизм пробоя. В p - n -переходах с напряжением пробоя более $\sim 6E_g/q$ пробой обусловлен в основном лавинным умножением носителей заряда. В области напряжений пробоя $4E_g/q > U_{проб} < 6E_g/q$ наблюдается смешанный (туннельно-лавинный) механизм пробоя. Надо сказать, что туннельная составляющая электрического пробоя

кремниевых p - n -переходов констатируется некоторыми исследователями ещё до уровня $U_{проб}$ порядка 33 В [7].

Характер переходных ВАХ – резкого лавинного, плавного туннельного и смешанного механизмов пробоя, представленных на рисунке 1.1, соответствует физике их образования – микроплазменности, туннелировании равномерно по всей площади p - n -перехода, “смещения”.

Плотность туннельного тока (J_T) через p - n -переход записывается следующим образом [8, 2-4]:

$$J_T = J_0 \cdot f_T, \quad (1.1)$$

где J_0 – множитель, определяемый числом валентных электронов в единице объёма и частотой их осцилляций (ν) в пределах валентной зоны (число соударений электронов с потолком валентной зоны в единицу времени); f_T – вероятность туннелирования электронов сквозь потенциальный барьер, образуемый наклонёнными под действием внешнего (U_R) и внутреннего барьерного (U_{Bi}) потенциалов зонами в области p - n -перехода шириной W_{p-n} .

Уточнённое выражение плотности туннельного тока можно записать следующим образом [5]:

$$j_T = \frac{\sqrt{2m^*} \cdot q^3 \cdot \varepsilon \cdot U}{4\pi^2 \cdot \hbar^2 \cdot E_g^{1/2}} \cdot \exp \left[-\frac{4\sqrt{m^*}}{3q \cdot \hbar} \cdot \frac{(E_g - \hbar\omega)^{3/2}}{\varepsilon} \right], \quad (1.2)$$

где $\hbar\omega$ – энергия фонона $\sim 0,036$ эВ, m^* – эффективная масса электрона.

Формула для f_T выведена в предположении однородного поля в p - n -переходе. Предполагается, что туннелирование происходит только в области \mathcal{E}_m , неоднородностью которой можно пренебречь вследствие малой её протяжённости.

Зависимость дифференциального сопротивления ($r_{z.m.}$) от напряжения и тока через p - n -переход при туннельном пробое записывается следующим образом [3]:

$$r_{д.т.} = \frac{U_R}{I_R} \cdot \left[1 + \frac{A(T)}{2\varepsilon_m} \right]^{-1}, \quad (1.3)$$

где $A(T) = \frac{4\sqrt{m^*} \cdot (E_g - \hbar\omega)^{3/2}}{3q \cdot \hbar} \rightarrow$ неявная функция от температуры.

Так как вероятность туннелирования f_T с увеличением напряжённости поля возрастает и особенно сильно в области значений \mathcal{E}_m от 10^5 до 10^6 В/см, характерной

для p - n -переходов с напряжениями пробоя менее ~ 5 В, ВАХ таких p - n -переходов отличаются значительной мягкостью (см. рисунок 1.1) и на практике понятие напряжение пробоя (стабилизации) p - n -переходов с туннельным пробоем можно рассматривать только для фиксированных значений обратного тока I_R . Отсюда для потребителей НВ стабилизаторов следует рекомендация предельно возможной стабилизации рабочего тока.

Поскольку генерация носителей при туннельном пробое определяется только напряжённостью поля, $\mathcal{E}_m = \text{const}$ для фиксированной величины I_R [4]. Это позволяет установить для резких p - n -переходов следующее соотношение между $U_{Br.T}$ и N_a, N_d :

$$U_{Br.T} = c \cdot \frac{N_a + N_d}{N_a \cdot N_d} = c \cdot N_I^{-1}, \quad (1.4)$$

где $c = \text{const}$, $N_I = N_a \cdot N_d / (N_a + N_d)$ – эффективная концентрация (N_{eff}) и $N_a \approx N_d$. Так как эффективная масса электронов проводимости в кремнии $m^* \sim 0,328m_0$, $A(T) > 10^7$ В/см, то есть по крайней мере на порядок больше \mathcal{E}_m ($\sim 10^6$ В/см).

Таким образом, с достаточной точностью дифференциальное сопротивление ($r_{d.m.}$) можно представить в виде [2]:

$$r_{d.t.} = \frac{U_R}{I_R} \cdot \frac{2\mathcal{E}_m}{A(T)}. \quad (1.5)$$

Выражение (1.11) для $r_{d.m.}$ при измерениях на постоянном токе на p - n -переходах с разными $U_{проб.}$ можно представить в виде линейной зависимости:

$$\ln r_{d.t.} \approx c_1 + c_2 \ln U_R, \quad (1.6)$$

где c_1, c_2 – постоянные, определяемые величиной тока через p - n -переход.

Другим важным параметром, по поведению которого можно судить о характере пробоя, является температурный коэффициент напряжения пробоя (β , %/°C). В случае туннельного пробоя β_m – величина отрицательная, т.к. обусловлена изменением ширины запрещённой зоны E_g с температурой [2]:

$$\beta_{T.} = \left. \frac{\partial U_{проб.}}{\partial T \cdot U_{проб.}} \right|_{I_R = \text{const}} = -3\gamma = 2 \frac{\partial A(T)}{\partial T \cdot A(T)} \approx -8.7 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\%}{^\circ\text{C}} \right), \quad (1.7)$$

где $\gamma = \frac{\partial E_g}{\partial T \cdot E_g}$ – относительный температурный коэффициент ширины запрещённой зоны. Для чисто туннельного механизма пробоя β_m не зависит от $U_{проб}$. Уточнённая зависимость $E_g(T)$ кремниевого p - n -перехода приведена в работе Сармонда [9]:

$$E_g(T) = 1.17 - \frac{4.73 \cdot 10^{-4} \cdot T^2}{(T+636)}. \quad (1.8)$$

С уменьшением эффективной концентрации N_I ширина p - n -перехода W_{p-n} возрастает, соответственно падает напряжённость электрического поля \mathcal{E}_m . И, как следствие этого, по экспоненте падает вероятность туннелирования f_T [2]. Уже для обратного напряжения $U_R = 4E_g/q$, что соответствует верхней границе напряжения пробоя U_{BR} при туннельном пробое, вероятность туннелирования f_T убывает на порядок – от величины 0,13 до 0,013. Соответствующие плотности токов равны ~ 30 и 4 мА/см².

При $U_R = 6E_g/q$, то есть при $\sim 6,7$ В, когда плотность туннельного тока становится пренебрежимо малой, ширина p - n -перехода настолько велика, что термически генерируемые и инжектируемые в p - n -переход электроны и дырки с большой вероятностью успевают получить от электрического поля энергию, достаточную для генерации пар электрон-дырка при столкновении с атомами решётки кремния [9, 10]. Для электронов в кремнии энергия ионизации (E_i) определена величиной $\sim (2,3-2,6)$ эВ. Выше этой величины ионизация электронами резко возрастает, о чём свидетельствует характер изменения обратных ветвей ВАХ высоковольтных p - n -переходов (см. рисунок 1.1).

Соответственно, в теории лавинного пробоя вводятся понятия коэффициента ионизации $\alpha(\mathcal{E})$ (α_n, α_p – для электронов и дырок) и коэффициента умножения $M(\mathcal{E})$ (M_n, M_p – для электронов и дырок). Первый определяет число ионизирующих столкновений на 1 см пути одной частицей, второй – отношение числа носителей на выходе к их количеству на входе.

Лавинный ток (I_a) записывается следующим образом [2]:

$$I_a = I_0(\mathcal{E}, T) \cdot M, \quad (1.9)$$

где I_0 – начальный ток, представляющий собой обратный ток I_R при малом обратном смещении.

Если образование лавины инициируется электронами, связь M_n , α_n , α_p записывается в следующем виде:

$$M_n = \{1 - \int_0^W \alpha_n \cdot \exp[-\int_x^W (\alpha_n - \alpha_p) dx] dx\}^{-1}. \quad (1.10)$$

В отличие от напряжения туннельного пробоя, связь которого с током туннелирования описывается “плавной” зависимостью экспоненциального вида, для лавинного пробоя можно установить определённый критерий, отвечающий сравнительно резкому росту обратного тока I_R , начиная с некоторого обратного напряжения пробоя $U_{Br.a.}$. В этом случае

$$\int_0^W \alpha_n \cdot \exp\left[-\int_x^W (\alpha_n - \alpha_p) dx\right] dx = 1 \quad (1.11)$$

и обратный ток через p-n-переход ограничен только некоторым внешним сопротивлением. За напряжение пробоя U_{Br} принимается напряжение, при котором коэффициент умножения $M = 1/0$, т.е. $\rightarrow \infty$.

Связь напряжения лавинного пробоя U_{Ba} с эффективной концентрацией N_I может быть представлена в виде:

$$U_{Br.T.a} = const \cdot N_I^{-\nu}, \quad (1.12)$$

где $\nu = 0,64 \dots 0,74$ для ударной ионизации и $\nu = 1$ для туннельного пробоя. Это объясняется тем, что ударная ионизация может происходить и при слабых полях, если расстояние, на котором электроны набирают энергию, достаточно велико. Отсюда следует также, что $N_\delta \gg N_a$ (или $N_a \gg N_\delta$) и $N_I \rightarrow N_a$ (или N_δ), т.е. напряжение лавинного пробоя определяется в основном концентрацией легирующей примеси в базе (N_B).

Для лавинного пробоя температурная зависимость напряжения пробоя ($\beta = \partial U_{Br.a} / \partial T \cdot \partial U_{Br.a}$) определяется в основном изменением длины свободного пробега носителей (ℓ) с температурой. Увеличение температуры ведёт к усилению взаимодействия носителей с решёткой, длина свободного пробега уменьшается. Т.о. температурный коэффициент напряжения лавинного пробоя p-n-перехода ($\beta_{л.}$) есть величина положительная и зависит от напряжения пробоя ($U_{Br.T.a}$).

В переходной области от лавинного к туннельному пробоя обратный ток p - n -перехода (I_{R0}) суммирует диффузионный ток неосновных носителей и генерационно-рекомбинационный ток в p - n -переходе, а также туннельный ток [7]:

$$I_{R0} = (I_T + I_s + I_{gr}) \cdot M, \quad (1.13)$$

где M – некоторый эффективный коэффициент умножения носителей, механизмы появления которых в p - n -переходе различны.

По определению Зи [5], переходная область соответствует диапазону U_R от $\sim 4E_g/q$ до $\sim 6E_g/q$, т.е. (4,5 – 6,7) В. Однако надо иметь ввиду, что определение границ переходной области носит несколько размытый характер. Так Чиновес [8] показал, что коэффициент ударной ионизации $M > 1$, начиная уже с $U_R > 1,2$ В.

Модель, учитывающую тонкую структуру p - n -перехода, предложил Винерт [7]. По Винерту электрон, туннелирующий из валентной зоны в зону проводимости, при некотором максимальном значении напряжённости поля \mathcal{E}_m прежде, чем достичь области, где он ускоряется полем, проходит некоторую “мёртвую” зону с протяжённостью

$$d = W_0[1 - 2E_g/q \cdot \mathcal{E}_m \cdot W_0], \quad (1.14)$$

где W_0 – ширина p - n -перехода.

Далее электрон ионизирует полупроводник на длине L , теряя энергию E_R при L/ℓ_R столкновениях с решёткой:

$$L = (W_0 - d) \{1 - E_R/q \cdot \mathcal{E}_m \cdot \ell_R - \sqrt{[1 - E_R/q \cdot \mathcal{E}_m \cdot \ell_R]^2 - 3E_g/q \mathcal{E}_m (W_0 - d)}\}. \quad (1.15)$$

Значения туннельной и ускоряющей областей d , L , а также остаточной области объёмного заряда $W_i = W_0 - d - L$, дающие представление о масштабах и структуре p - n -переходов с туннельным и смешанным механизмами пробоя, приведены в таблице 1.1 [7]. Там же значения I_0 , U_0 , соответствующие начальным точкам умножения в p - n -переходе с напряжением U_{BR} .

Точно так же, по Хайтцу [11] некоторое туннелирование имеет место даже в p - n -переходах с $U_{BR} \sim (30-35)$ В. Туннельная составляющая обратного тока для p - n -переходов с более низкими напряжениями пробоя существенно возрастает вследствие уменьшения ширины области пространственного заряда.

Таблица 1.1 – Электрические и “структурные” параметры низковольтных p - n -переходов [7]

U_{BR} , В	I_0 , мА	U_0 , В	\mathcal{E}_m , мВ/см	W_0 , Å	d , Å	L , Å	W_i , Å	$\mathcal{E}(d + L)$, мВ/см
2,5	70	3,3	2,0	420	55	155	210	1,05
3	9	2,3	1,8	470	60	160	250	1,00
4	1	3,4	1,4	620	80	180	360	0,84
5	0,2	3,8	1,3	730	85	195	450	0,78
6	0,05	4,5	1,1	1000	100	220	680	0,75

Анализ тонкой структуры p - n -перехода, различающий пролётное пространство и слой умножения в области \mathcal{E}_m , детально проводится при рассмотрении лавинно-пролётных диодов ЛПД [12]. Модель ЛПД соответствует классу p - n -переходов с напряжением пробоя $U_{BR} > 10$ В, поэтому, для предмета рассмотрения настоящей работы – НВ p - n -переходы, интереса не представляет.

Зенеровский диод в переходной области может быть представлен как параллельная комбинация двух диодов – одного с напряжением пробоя $U_{Br.T}$, определяемым умножением туннелирующих носителей ($M_T \cdot I_T$), и второго – с напряжением пробоя $U_{Br.g}$, определяемым умножением генерационно-рекомбинационных носителей ($M_g \cdot I_{gr}$). Их отношение:

$$(U_{Br.T} + U_{Br.i}) / (U_{Br.g} + U_{Br.i}) = 1 + d/W_0. \quad (1.16)$$

Таким образом, поведение параметров U_{Br} , r_z , β в зависимости от параметров N_I и I_R представляют собой в переходной области пробоя суперпозицию функций, характеризующих туннельный и лавинный механизмы пробоя.

В зависимости $U_{Br}(N_I)$ имеется излом, соответствующий различию показателей степени ν (1.12). Температурный коэффициент напряжения пробоя β претерпевает плавный переход от отрицательных к положительным значениям и в области ~ 5 В проходит через ноль. Точное значение β определяется величиной плотности тока через p - n -переход.

Зависимость дифференциального сопротивления r_{∂} от обратного тока I_R и обратного напряжения U_R имеет вид:

$$r_{\partial} \approx \exp(-\text{const} \cdot U_R^{0,25}). \quad (1.17)$$

В переходной области наблюдается уменьшение дифференциального сопротивления r_{∂} с ростом обратного напряжения U_R , что связано со снижением максимальной напряжённости поля \mathcal{E}_m при увеличении обратного напряжения U_R . Т.е., если пробой носит преобладающий туннельный или преобладающий лавинный характер, r_{∂} возрастает с ростом U_R , а в переходной области r_{∂} снижается, Рисунок 1.2 [7].

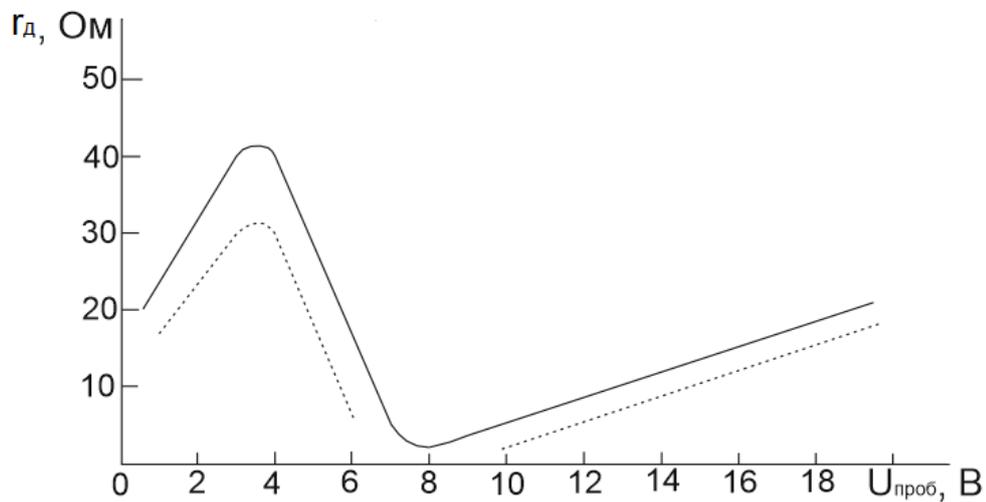


Рисунок 1.2 – Зависимость дифференциального сопротивления от напряжения пробоя НВ p - n -переходов: $\cdots \rightarrow$ теория; $\text{—} \rightarrow$ эксперимент (сплавные p - n -переходы) [7]

Таким образом, области действия туннельного и лавинного пробоя характеризуются определёнными зависимостями параметров U_R , I_R , r_{∂} друг от друга. Плавный ход обратной ветви ВАХ p - n -переходов с отчётливой составляющей туннельного тока свидетельствует о больших значениях одного из основных параметров стабилитронов – дифференциального сопротивления, что очень нежелательно.

1.1.2 Физические модели низковольтных $p-n$ -переходов

Удобный инструмент для математического описания, анализа механизмов пробоя и определения ориентиров при выборе и создании технологий получения НВ $p-n$ -переходов – их физические модели, Рисунки 1.3 – 1.5 [14-17].

Область интересов настоящей работы – низковольтные $p-n$ -переходы с туннельным и смешанным механизмами пробоя и разработка на их основе НВ стабилитронов ($U_{cm} < 7$ В), термокомпенсированных стабилитронов с $U_{cm} \sim 6,2$ В, а также НВ ограничителей напряжения ($U_{проб} < 15$ В).

Практический интерес для задачи получения НВ $p-n$ -структур представляют модели “резкого” (ступенчатого) $p-n$ -перехода, градиент концентрации ($\alpha = dN/dx$) в котором при переходе из p -области в n -область стремится к бесконечности (рисунок 1.3 а) и линейного (“плавного”) $p-n$ -перехода, градиент концентрации в котором конечен (рисунок 1.3 б), а также “сверхрезких” $p-n$ -переходов (рисунки 1.4, 1.5). Обратим также внимание на то, что в данном случае понятие “резкости” противоречит виду присущих $p-n$ -переходам с лавинным и туннельным механизмами пробоя ВАХ (см. рисунок 1.1).

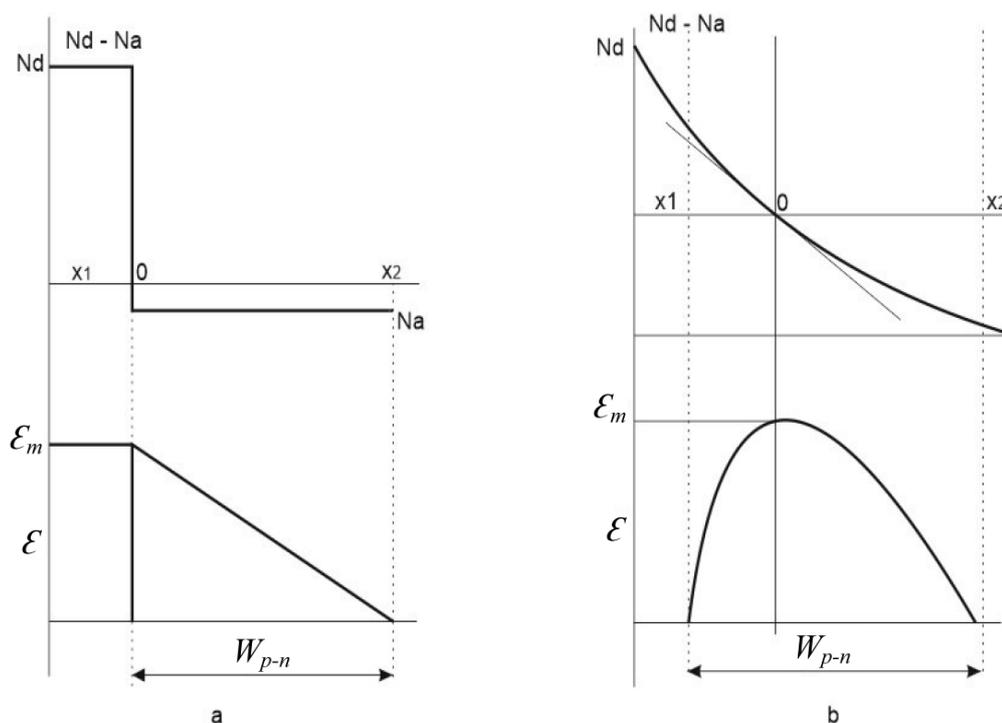


Рисунок 1.3– Модели резкого (а) и линейного (б) $p-n$ -переходов [14]

На рисунке 1.3 обозначены \mathcal{E}_m – максимальная напряжённость; W_{p-n} – ширина области пространственного заряда (ОПЗ); N_d , N_a – концентрации легирующих примесей n - и p -типов проводимости.

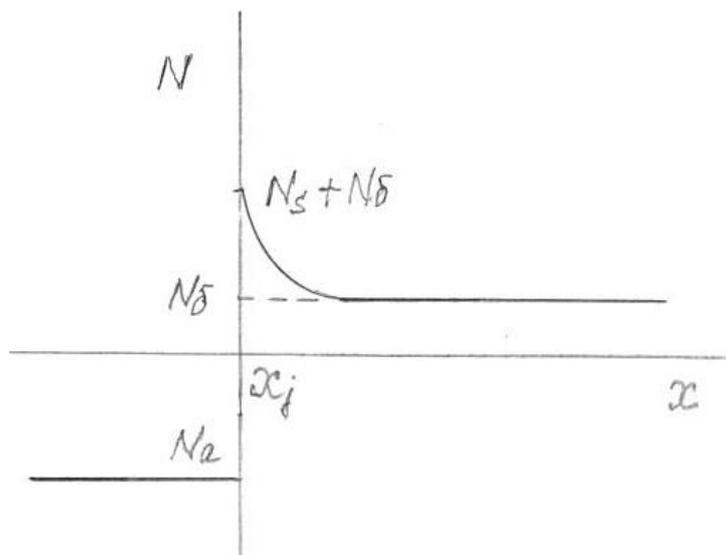


Рисунок 1.4 – Модель “сверхрезкого” p - n -перехода с концентрацией легирующей примеси, убывающей по экспоненте [15]

В качестве определённой перспективы улучшения параметров стабилитронов, в частности, термокомпенсированных стабилитронов, представленных в настоящей работе как одно из направлений использования НВ диффузионных p - n -переходов, снижение величины их дифференциального сопротивления r_d , т.е. повышения коэффициента качества ($Q \sim r_d^{-1}$), следует упомянуть о результатах теоретических исследований Сущика и Юханова [13], направленных на возможность улучшения качества НВ p - n -переходов за счёт использования сверхрезких p - n -структур в области $U_{BR} > 4$ В (см. Рисунок 1.5). Для сверхрезких p - n -структур предполагается сдвиг правой границы переходной области на $\sim 1,2$ В влево, что расширяет область лавинного пробоя в сторону меньших напряжений с относительно низкими дифференциальными сопротивлениями. Отметим, что в прикладном качестве эта идея развития не получила.

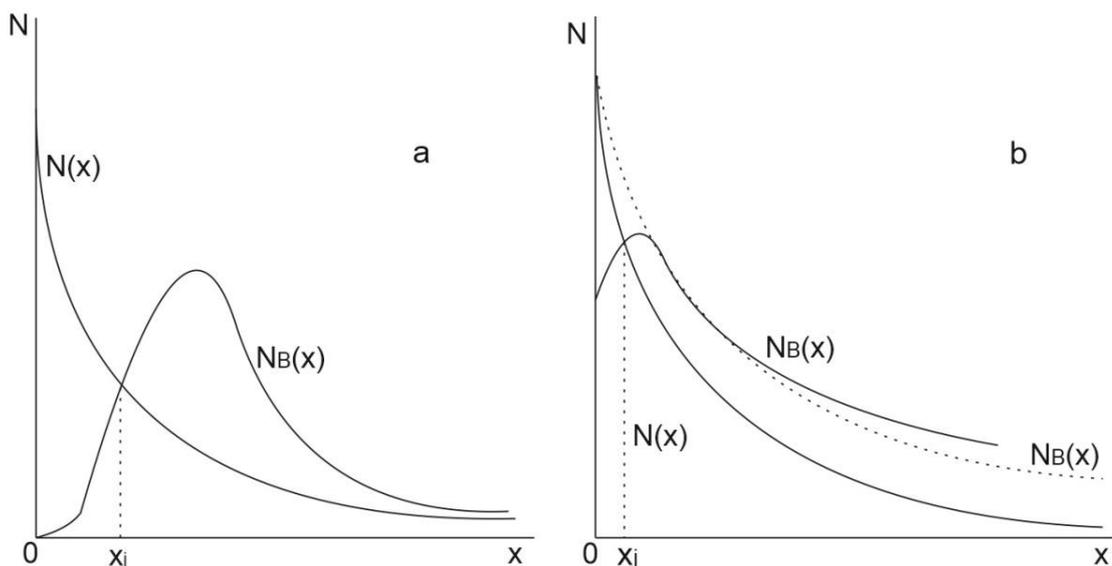


Рисунок 1.5 – Модели “сверхрезких” $p-n$ -переходов: а – отрицательный градиент концентрации – встречная диффузия [16]; б – отрицательный градиент концентрации – экзодиффузия [17]; x_j – глубина залегания $p-n$ -перехода

Таким образом, к сверхрезким $p-n$ -переходам относят $p-n$ -структуры, в которых концентрация базовой примеси (N_b) вблизи поверхности (N_s) изменяется по экспоненте или с отрицательным градиентом: $N(x) = N_s - \alpha \cdot x$ [16, 17]. Резкие $p-n$ -переходы принято соотносить сплавным и эпитаксиальным, линейные – диффузионным, сверхрезкие – к $p-n$ -переходам, сформированным либо встречной диффузией, либо экзодиффузией легирующей примеси.

С помощью уравнения Пуассона и граничных условий, определяемых значениями напряжённости поля и потенциалами на границах объёмного заряда $p-n$ -перехода (ОПЗ), для каждого из рассматриваемых $p-n$ -переходов выводятся выражения максимальной напряжённости поля (\mathcal{E}_m), ширины пространственного заряда (W_{p-n}) и величины ёмкости (C_{tot}), на основании которых в каждом конкретном случае проводится оценка характера распределения легирующей примеси и величины напряжения пробоя.

В частности, для теоретических резкого и линейного $p-n$ -переходов ширина W_{p-n} и напряжение U_{Bi} связаны следующими выражениями:

$$W_{p-n \text{ резк}} = \left[\frac{2\epsilon \cdot \epsilon_0}{q \cdot Na} (UBi - U) \right]^{1/2}, \quad (1.18)$$

$$W_{p-n \text{ лин}} = \left[\frac{3\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{2q \cdot N \cdot \alpha} (UBi - U) \right]^{1/3} \quad (1.19)$$

При некотором критическом обратном напряжении на *p-n*-переходе ($U_{Br.kp.}$) ток через *p-n*-переход существенно возрастает. Для *p-n*-переходов с $U_{Br} \geq \sim 7$ В рост тока пробоя – резкий, для *p-n*-переходов с $U_{Br} \leq \sim 5$ В – плавный. В диапазоне U_{Br} от ~ 5 до ~ 7 В наблюдаются переходные ВАХ от плавного к резкому механизмам пробоя.

С другой стороны, к проблеме получения НВ *p-n*-структур присоединяется проблема, связанная непосредственно с задачей производства базовых однородных сильнолегированных монокристаллов кремния с воспроизводимыми электрофизическими характеристиками, т.е. с высокой однородностью распределения высококонцентрационной легирующей примеси и минимальным количеством структурных дефектов в пересыщенной кристаллической решётке кремния [18].

1.2 Технологические аспекты проблемы получения диффузионных кремниевых *p-n*-переходов с туннельным пробоем

1.2.1 Выбор легирующей примеси для формирования “резких” *p-n*-переходов

Необходимость создания НВ диффузионных *p-n*-переходов с градиентом концентрации легирующей примеси на уровне 10^{24} см^{-4} , диктует специфические требования к таким свойствам легирующих примесей как предельная растворимость и структурная совместимость атомов легирующей примеси, замещающих атомы кремния, с атомами кремния в кремниевой подложке.

Очевидно, что для формирования “резких”, т.е с высоким градиентом концентрации легирующей примеси, *p-n*-переходов примесь должна отличаться высокой “объёмной” совместимостью с атомами кремния, относительно высокой предельной растворимостью в кремнии и относительно низким коэффициентом диффузии. Последнее необходимо для формирования крутого фронта распределения диффундирующей примеси. Из донорных примесей (P, As, Sb) этому условию лучше всех отвечает мышьяк, [19], рисунок 1.6.

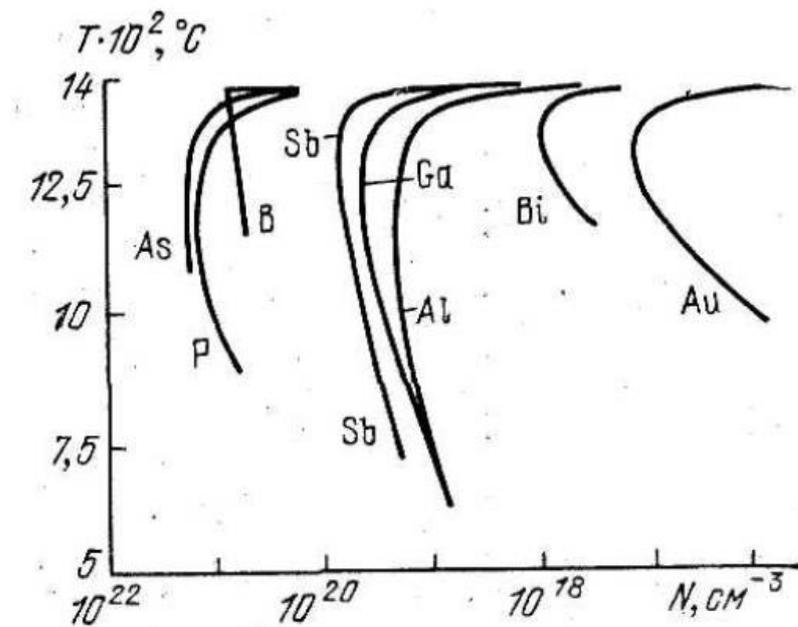


Рисунок 1.6 – Температурные зависимости легирующих примесей в кремнии [19]

В работе [20] показано, что преимущества As могут быть полностью реализованы не только с помощью способа ионной имплантации, но и технологией диффузии в эвакуированной ампуле. Тем более что для эффективного, т.е. на достаточную глубину, внедрения относительно тяжёлого As в кремний необходимы высокоэнергетичные установки ионного легирования – на уровне (150-400) кэВ.

Помимо высокой предельной растворимости, As отличается на порядок меньшим коэффициентом диффузии, чем широко используемый в технике полупроводников приборный донорный элемент – фосфор. Эффективный коэффициент диффузии As может быть в 20...40 раз выше, чем классический, показанный Фуллером [21], что объясняется концентрационной зависимостью скорости диффузии легирующих элементов в кремнии, имеющей максимум в области высоких значений концентрации легирующей примеси, в то время как коэффициент диффузии фосфора – только в 5...8 раз [22]. Кстати, Фуллер в экспериментах по определению коэффициентов диффузии легирующих примесей пользовался окисными источниками диффузии. В частности, для диффузии As использовался оксид мышьяка As_2O_3 . Эффект относительно высокой

концентрационной зависимости коэффициента диффузии As в кремнии является хорошей предпосылкой для формирования “резких” НВ *p-n*-переходов на относительно большой глубине. Кроме того, фронт диффузии As в кремнии, легированном бором, форма которого зависит от степени однородности распределения основной легирующей примеси в кремнии, должен быть более равномерным.

Диффузией As ампульным методом в кремний удаётся сформировать профили с градиентом концентрации на полпорядка большим, чем для фосфора [22], таблица 1.2.

Таблица 1.2 – Параметры диффузионных *p-n*-переходов, полученных из разных источников диффузии

Диффузант	$N_s, \text{см}^{-3}$	$x_j, \text{мкм}$	$\alpha, \text{см}^{-4}$	$\rho_s, \text{Ом}/\square$	$T, \text{°C}$	$t, \text{мин}$
POCl_3	$8 \cdot 10^{20}$	0,483	$3 \cdot 10^{23}$	22	900	40
PH_3	$1 \cdot 10^{21}$	0,584	$3 \cdot 10^{23}$	17	850	43
As	$5 \cdot 10^{20}$	0,533	$1 \cdot 10^{24}$	15	1000	85

В то же время, As, вследствие приближенности тетраэдрического радиуса его атомов к радиусу атомов Si (таблица 1.3), более совместим с кристаллической решёткой кремния [5,14, 23], что минимизирует количество структурных дефектов в *p-n*-переходе. Поэтому даже при предельно высоких уровнях легирования и градиентов концентрации As в Si предел текучести Si не достигается и дислокации несоответствия не генерируются. Из дефектов в объёме Si наблюдаются только дислокационные петли и выделения второй фазы [24].

Таблица 1.3 – Сравнение характеристик мышьяка с характеристиками других легирующих примесей

Элемент	Предельная растворимость при 1150°С, см ⁻³	Коэффициент диффузии при 1150°С, см ² ·с ⁻¹	Тетраэдрический радиус, Å
Si	–	–	1,17
P	1·10 ²¹	1·10 ⁻¹²	1,10
As	2·10 ²¹	1·10 ⁻¹³	1,18
Sb	4·10 ¹⁹	8·10 ⁻¹⁴	1,36
B	6·10 ²⁰	1·10 ⁻¹²	0,88

Благодаря лучшей, чем другие легирующие примеси, совместимостью As с решёткой кремния, легированный мышьяком эмиттер выдерживает без заметного ухудшения характеристик существенно большие плотности токов, даже при глубине диффузии свыше 1 мкм.

Таким образом, As представляется наиболее перспективной легирующей примесью для создания НВ диффузионных *p-n*-структур.

Здесь же лежит проблема получения качественного кремниевого слитка, т.е. с однородным распределением легирующей примеси как по площади среза, так и по длине, с минимальным количеством структурных дефектов в сильнолегированном кремнии. Первые усилия по решению отечественной промышленностью задачи создания НВ планарно-диффузионных *p-n*-структур и получения качественного сильнолегированного кремния пришлись на начало семидесятых годов. Важную роль в этом сыграли ведущие предприятия электронной промышленности, исследовавшие поставляемый им кремний, и промышленности производства кремния для электроники, разрабатывавшие и усовершенствовывавшие технологии его производства, – предприятия ФГУП «САПФИР», ФГУП «ПУЛЬСАР», ФГУП «НЗПП с ОКБ», Красноярский Завод Цветных Металлов.

Удалось создать технологии получения сильнолегированного кремния с предельной концентрацией фосфора $8 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$ (кремний марки КЭФ с удельным сопротивлением $\geq 0,008 \text{ Ом}\cdot\text{см}$), бора $> 10^{20} \text{см}^{-3}$ (кремний марки КДБ с удельным сопротивлением $\geq 0,001 \text{ Ом}\cdot\text{см}$).

1.2.2 Поиск эффективной диффузионной технологии получения низковольтных *p-n*-структур

Уже на ранней стадии исследования сплавных низковольтных кремниевых *p-n*-переходов предпринимались многочисленные попытки получения их диффузионными методами [25-27]. Например, в [28] образцы таких *p-n*-структур изготавливали диффузией фосфора в кремний *p*-типа проводимости с удельным сопротивлением $0,007 \dots 1,0 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ в режиме, обеспечивавшем глубину залегания *p-n*-перехода на уровне не менее $2 \dots 3 \text{ мкм}$. Однако таким образом, на основе существовавших и модернизируемых способов и технологий диффузии удавалось получить *p-n*-переходы с напряжением пробоя ($U_{проб}$) только свыше $5 \dots 6 \text{ В}$, т.е. с шириной области пространственного заряда $\sim 400 \text{ \AA}$. Причём, даже для этих стабилитронов не удавалось обеспечить величины электрических параметров, в частности, дифференциального сопротивления (r_d), аналогичные параметрам таких, например, выпускавшихся в то время, сплавных серийных стабилитронов, как серия стабилитронов Д814А – Д814Д [29].

Требуемые значения r_d , в частности для наиболее критичных в этом отношении стабилитронов с напряжением стабилизации $7,5 \text{ В}$, достигались для *p-n*-переходов с глубиной залегания менее 1 мкм , сформированных одностадийной (осаждение) диффузией фосфора из жидкого источника PCl_3 в режиме 1150°C , 30 мин . Однако такие стабилитроны проявляли нестабильность уже в процессе измерения электрических параметров и не выдерживали даже кратковременных испытаний на надёжность.

Опираясь на то, что “ступенчатая аппроксимация хорошо удовлетворяет очень мелким диффузионным *p-n*-переходам”, попытки получения на этой основе предпринимались и далее. В работе [30] диффузией фосфора в кремний с удельным сопротивлением $0,001 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, $0,002 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, т.е. с предельной концентрацией

базовой легирующей примеси – бора, исследована возможность получения $p-n$ -структур с напряжением пробоя $U_{проб}$ (4,7-5,6) В. Для этого диапазона напряжений проблема достижения требуемых, аналогичных сплавным НВ $p-n$ -структурам, величин r_{δ} не стояла так остро, как это было для диапазона напряжений стабилизации (7-14) В в работе [29]. Но и в этом случае образцы НВ стабилитронов испытания на надёжность не выдержали. Имелись и другие сообщения о неудачных попытках получения НВ стабилитронов по планарно-диффузионной технологии. Некоторые примеры конструктивно-технологических исполнений кристаллов НВ стабилитронов в этих попытках приведены на рисунке 1.7.

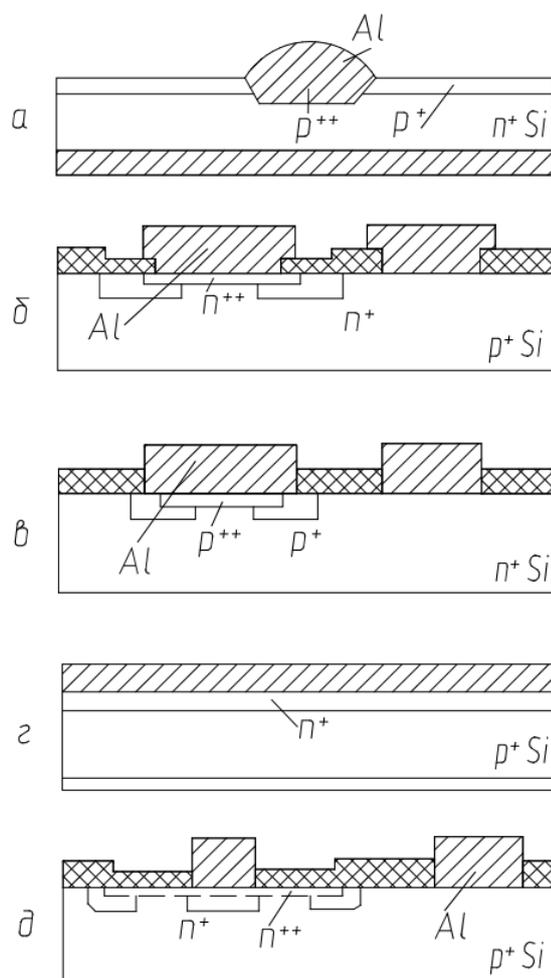


Рисунок 1.7 – Конструктивно-технологические исполнения кристаллов низковольтных стабилитронов: а – диффузионно-сплавная конструкция; б – диффузионная конструкция; в – планарная диффузионно-сплавная конструкция; г – эпитаксиальная конструкция; д – конструкция с ионно-легированным $p-n$ – переходом

1.2.2.1 Диффузия в окислительной и неокисляющей средах

Для решения задач настоящей работы необходимо показать причины ограничения диффузионных способов получения “резких”, достаточно глубоких *p-n*-переходов.

При классификации способов диффузии легирующих примесей в кремний, используемых для получения *p-n*-структур, можно разделить их в зависимости от состояния, в котором находится источник легирующей примеси: газообразное, жидкое и твёрдое. В другом случае различают два основных направления – способы диффузии в “открытой” и “закрытой” трубе, а затем уже каждому из них соотносят тот или иной способ диффузии или его разновидность [31].

В наших целях все способы диффузии предложено разделить на диффузию в окисляющей среде и диффузию в неокисляющей среде. В первом случае в зоне реакции и на поверхности легируемого полупроводника на первой стадии образуются оксиды диффундируемых элементов в виде стеклообразного слоя. На границе раздела происходит восстановление оксидов и далее – собственно диффузия легирующей примеси в кремний. В неокисляющей среде процесса стеклообразования не происходит, легирующая примесь непосредственно диффундирует в решётку кремния.

При диффузии в окислительной среде кислород может присутствовать как в свободном, так и в связанном виде. Например, – в составе какого либо окисного соединения легирующего элемента. В частности, это – диффузия из легированных окисных плёнок. Безкислородные способы могут быть представлены газотранспортной диффузией, вакуумной диффузией, методом закрытой трубы (диффузия в эвакуированном реакторе) и бокс-методом (квазизамкнутый объём) с применением безкислородных источников.

Принципиальные отличия рассматриваемых двух направлений / механизмов диффузии вытекают из отличий характеризующих эти способы кинетик диффузионных процессов.

Процесс диффузии в окислительной среде распадается на следующие основные стадии:

- перенос диффузанта в зону реакции к поверхности полупроводника;
- химические реакции на поверхности полупроводника с образованием стеклообразного слоя;
- восстановление окисных соединений при контакте с нагретым до температуры диффузии полупроводником;
- диффузия легирующей примеси в полупроводник по механизмам замещения или внедрения;
- диффузия атомов примеси собственно в теле полупроводника;
- диффузия окисных соединений легирующей примеси сквозь обеднённый стеклообразный слой к поверхности полупроводника.

Т.е. диффузия в окислительной среде – типичный многостадийный гетерогенный процесс, результирующая скорость которого определяется скоростями переноса диффузанта на отдельных его стадиях к поверхности полупроводника. В конечном счёте, характеристики диффузионного слоя – поверхностная концентрация легирующей примеси (N_s), глубина залегания p - n -перехода (x_j) и собственно профиль легирования определяются, кроме режима диффузии (T, t), интегральной скоростью переноса диффузанта к поверхности полупроводника. Важно поэтому определить лимитирующую стадию механизма переноса диффузанта, что может послужить одним из критериев выбора способа / технологии получения НВ p - n -структур. Такой стадией, очевидно, является перенос диффузанта сквозь стеклообразный слой на поверхности полупроводника.

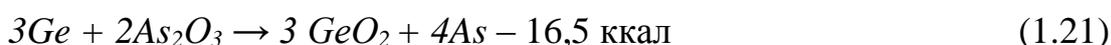
Подтверждением этого заключения могут служить, например, данные работы [32], в которой показано, что при диффузии бора в кремний увеличение концентрации кислорода в газовой смеси ведёт к снижению величины N_s вследствие повышения количества оксида кремния SiO_2 в “стекле” и соответствующего роста его вязкости. С течением времени происходит увеличение толщины “стекла”, что ещё больше препятствует движению оксида диффузанта к поверхности полупроводника.

Т.е. стадия, связанная с формированием стеклообразной фазы и движением сквозь неё оксидов легирующей примеси является лимитирующей для процесса диффузии в окислительной среде. Ограничение скорости протекания реакций на поверхности полупроводника свидетельствует о том, что для процесса диффузии в окислительной среде существует ограничение величины предельной поверхностной концентрации легирующей примеси, не выполняется условие постоянства источника диффузии, что прямо влияет на параметры диффузионного слоя и однородность распределения их по площади. Эти эффекты особенно чувствительны в случае мелкозалегающих p-n-переходов. Отрицательным фактором является также необходимость удаления “стекла” с поверхности легируемых пластин после завершения процесса диффузии. Вместе со “стеклом” удаляется слой Si толщиной $\sim 0,45$ толщины слоя “стекла”. Причём, толщина удалённого слоя “стекла” и вместе с ним слоя Si воспроизводится плохо.

С целью снижения лимитирующего действия стеклообразного слоя применяются специальные меры. Например, в [33] приведён оригинальный способ ускорения переноса As сквозь силикатное стекло к поверхности Si введением в реактор некоторого количества германия. В этом случае, помимо реакции на поверхности Si:



стандартная свободная энергия протекания которой достаточно велика, имеет место следующая реакция:



с существенно меньшим тепловым эффектом. В результате высвобождаются атомы As, диффундирующие сквозь “стекло” с повышенной скоростью в сравнении с молекулами As_2O_3 . Подобное действие на перенос As в “стекле” оказывает также отжиг легированного оксида в водороде.

В работе [32] исследованы причины неоднородности диффузионного слоя при диффузии As из жидкого источника в виде $AsCl_3$ и тетраэтилортосиликата. Окислитель – кислород. В качестве газа-носителя использовался азот. Показано, что при диффузии As, сопровождающейся образованием “стекла”, разброс

поверхностного сопротивления (ρ_s) диффузионного слоя существенно зависит практически от всех параметров/факторов процесса: концентрации O_2 , скоростей потоков O_2 , N_2 , и диффузанта, температуры осаждения, охлаждения легируемых пластин кремния потоком газа - носителя конструкции реактора и т.д. Для улучшения однородности / равномерности диффузии в окислительной среде используют специальные технические приёмы. Например, за счёт периодического изменения скорости потока газа-носителя (N_2) в зоне реакции создаются условия турбулентности газовой смеси, что способствует выравниванию параметров диффузионного слоя [34]. Проблемы диффузии, обусловленные неоднородностью газовой смеси, устраняются в известной степени при диффузии из легированных силикатных плёнок [35].

При диффузии в неокисляющей среде показанная выше кинетическая последовательность протекания диффузионного процесса существенно упрощается. Нет стадий, связанных с формированием стеклообразного слоя и диффузией через него оксидов легирующих элементов. Определяющей является стадия диффузии атомов примеси через поверхность в объём полупроводника. Тем самым обеспечиваются более высокие значения величин поверхностной концентрации и глубины залегания p-n-перехода (N_s, x_j).

В то же время, диффузионные системы позволяют осуществлять процессы как в окислительной, так и в неокислительной средах. Однако последний в большинстве случаев даже не рассматривается по причине эрозии поверхности полупроводника в отсутствие кислорода и процесса стеклообразования. В этом случае имеет место образование на поверхности легируемых пластин труднорастворимых налётов/осаждений, неоднородность распределения параметров по пластине и невоспроизводимость процессов в целом.

1.2.2.2 Диффузия в эвакуированном реакторе

Наиболее эффективный способ, позволяющий осуществлять диффузию в безкислородной среде, – диффузия в эвакуированном реакторе [36-43], что обусловлено несколькими причинами.

При современном уровне технологии чистых материалов и высокого уровня развития технологии химической обработки и очистки полупроводниковых пластин и кварца, в объём ампулы можно поместить строго рассчитанные количества легирующих элементов, радикально ограничив при этом присутствие посторонних химических элементов и, в частности, кислорода. Концентрации легирующей примеси в ампуле могут быть заданы в широком диапазоне – от низких уровней легирования, до уровня, соответствующего пределу растворимости. Например, основоположники промышленного применения ампульного метода Армстронг и Даффи [43] показали, что диффузией в кремний из порошка кремния, легированного бором, фосфором или мышьяком формируются слои с поверхностной концентрацией, точно соответствующей базовой концентрации порошка – источника в диапазоне концентраций от 10^{17} до 10^{20}см^{-3} , рисунок 1.8.

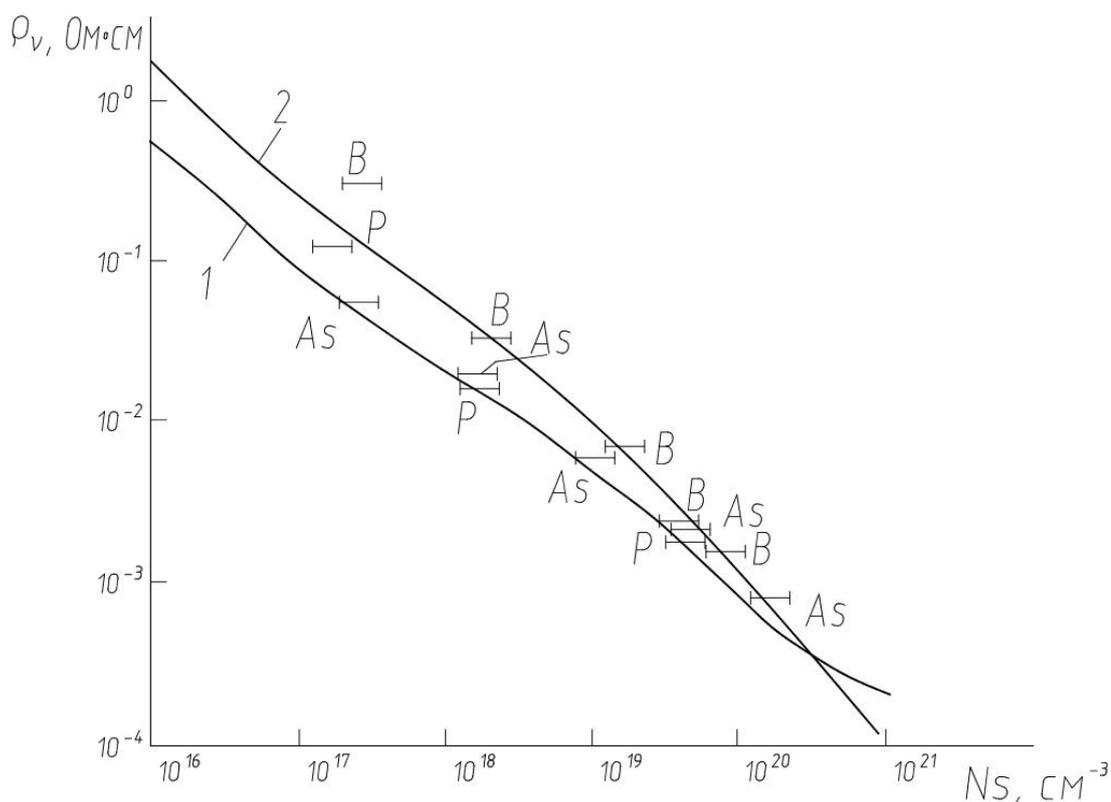


Рисунок 1.8 – Зависимость поверхностной концентрации (N_s) легирующей примеси в диффузионном слое от удельного сопротивления (ρ_v) кремниевого источника диффузии ампульным методом, легированного бором, фосфором, мышьяком (B, P, As) [43]

В [43] установлено также, что уже при 920°C диффузией As по методу закрытой трубы обеспечивается величина поверхностной концентрации $N_s \sim 1,5 \cdot 10^{20} \text{см}^{-3}$. В то же время по методу открытой трубы в окислительной среде при температуре 1250 °C величина N_s достигает значения не более $5,7 \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$. Однако в первом случае *p-n*-переход создавали на глубине 0,18 мкм, во втором – на глубине 4,2 мкм.

В [38] ампульный метод диффузии применили для получения *n-p-n*- СВЧ транзисторов при формировании эмиттера. В широком диапазоне температур и давлений As достигнуты N_s на уровне $2 \cdot 10^{20} \text{см}^{-3}$ при глубине залегания *p-n*-перехода 0,1...0,5 мкм. Показано, что глубина диффузии As ампульным методом контролируется и воспроизводится даже для таких ничтожных величин x_j .

Газодинамическое равновесие в замкнутом разреженном объеме ампулы, помещенной в диффузионную печь, устанавливается практически мгновенно. Т.е. процесс диффузии в ампуле протекает квазиравновесным образом, что позволяет разработать математическую модель процесса с привлечением ограниченного числа контролируемых параметров.

Так как загрузка легируемых пластин в ампулу производится плотным пакетом, помимо важных физико-химических свойств, процесс диффузии в эвакуированном реакторе отличается практически неограниченной производительностью: при необходимости одновременно в ампуле можно легировать пакет до 1000 пластин Ø 40 мм [44], или до 700 пластин Ø 76, Ø 100 мм [42].

Выводы к главе 1

На основании результатов анализа теории механизмов пробоя НВ *p-n*-переходов, соответствующих им физических эффектов, границ их действия, и электрических параметров НВ *p-n*-переходов, можно указать на следующие основные характеристики “резких” низковольтных *p-n*-переходов, на которые следует ориентироваться в поиске замещающего способ сплавления Al в Si способа получения планарных диффузионных *p-n*-переходов, разработке технологии получения таких *p-n*-структур, исследовании их характеристик и

разработке на этой основе планарных НВ стабилитронов, НВ термокомпенсированных стабилитронов, НВ ограничителей напряжения:

1. Практический интерес для задачи получения НВ диффузионных $p-n$ -структур представляют модели “резкого” $p-n$ -перехода, характерного для сплавного $p-n$ -перехода, градиент концентрации акцепторной примеси Al в котором при переходе из p -области в n -кремниевую область стремится к бесконечности ($\Delta N_{p-n} > 10^{24} \text{ см}^{-4}$).

2. Так как протяжённость области туннелирования в НВ $p-n$ -переходе, характерная для $p-n$ -переходов с напряжениями пробоя менее ~ 5 В, пренебрежимо мала (менее 100 \AA), что соответствует напряжённости поля порядка 10^6 В/см и высокой вероятности туннелирования, ВАХ таких $p-n$ -переходов отличаются значительной мягкостью.

В прикладном плане, это может свидетельствовать о нечувствительности туннельного пробоя к дефектам кремниевой структуры, т.е. о регулярной зависимости напряжения туннельного пробоя от плотности тока через $p-n$ -переход / площади $p-n$ -перехода. Из “плавности” ВАХ туннельных $p-n$ -переходов следует также рекомендация для потребителей НВ стабилитронов о необходимости жёсткой стабилизации рабочего тока.

3. 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

$$N_{\text{эфф}} = \frac{N_a \cdot N_d}{N_a + N_d}.$$

4. 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 температурного коэффициента напряжения пробоя от напряжения

пробоя претерпевает плавный переход от отрицательных к положительным значениям и проходит через ноль.

5. Дифференциальное сопротивление низковольтных p - n -переходов (r_d) подчиняется N -образной зависимости от напряжения пробоя ($U_{проб}$) с максимумом на границе перехода от туннельного к смешанному пробоя ($\sim 4,7$ В) и минимумом на границе перехода от смешанного к лавинному пробоя ($\sim 6,7$ В).

6. На основании таких критериев отбора, как тетраэдрический радиус, высокая предельная растворимость в кремнии и коэффициент диффузии, в качестве наиболее эффективной легирующей примеси для формирования “резких” диффузионных p - n -переходов выбран мышьяк.

7. В качестве наиболее эффективного способа диффузии легирующей примеси для формирования “резких” диффузионных p - n -переходов выбран способ высококонцентрационной диффузии As в эвакуированном реакторе из неограниченного источника.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ДИФФУЗИОННЫХ *p-n*- СТРУКТУР

На основе положений, представленных в главе 1 диссертации, разработана базовая планарно-диффузионная технология получения низковольтных *p-n*-переходов с туннельным и смешанным механизмами пробоя, изготовлены и исследованы образцы НВ *p-n*-структур, выявлен ряд физических и технологических факторов, определяющих основные электрические параметры НВ *p-n*-структур, разработаны промышленные технологии изготовления низковольтных стабилитронов, термокомпенсированных стабилитронов и ограничителей напряжения.

Во второй главе представлены результаты разработки и оптимизации базовой технологии изготовления НВ *p-n*-структур, по методу высококонцентрационной диффузии As в условиях эвакуированной кварцевой ампулы, замещающей технологию вплавления Al в Si; выявления физических эффектов, связанных с технологией получения таких структур; исследования электрофизических параметров образцов таких структур и получения пакета рабочих зависимостей основных электрических параметров НВ диффузионных *p-n*-структур от конструкционных и технологических факторов, необходимого для создания промышленных технологий изготовления планарных НВ стабилитронов, в т.ч. термокомпенсированных стабилитронов, и НВ ограничителей напряжения.

2.1 Оценка граничных условий проведения экспериментов

Расчёт был на получение планарных *p-n*-структур с $U_{проб}$ в диапазоне (2÷15) В. Специфика получения *p-n*-структур для стабилитронов, в отличие от технологии ИМС, – необходимость использования широчайшей по величине удельного сопротивления номенклатуры кремниевых пластин. Так как в качестве легирующей примеси выбран мышьяк, эксперименты по получению НВ диффузионных *p-n*-структур проводились на кремнии *p*-типа проводимости, т.е. “традиционном” промышленном кремнии марки КДБ, обладающем достаточно

однородными характеристиками слитков кремния вплоть до концентраций базовой примеси – бора $\sim 10^{20}\text{см}^{-3}$ (КДБ0,001).

Сопротивление 0.001 Ом·см – практически предельно высокий уровень промышленного легирования кремния бором, что необходимо для получения $p-n$ -структур с минимальным напряжением пробоя. С другой стороны, приближение линейного распределения легирующей примеси в диффузионном $p-n$ -переходе позволяет оценить минимальную величину концентрации базовой примеси, необходимую для формирования в кремнии $p-n$ -переходов с граничным для туннельного эффекта значением $U_{\text{проб}} \approx 7$ В.

Для расчёта воспользуемся приближённым значением критической величины напряжённости поля в $p-n$ -переходе, начиная с которой квантовая вероятность туннелирования становится достаточно существенной: $\mathcal{E}_m \approx 10^6$ В/см [5].

Приближение линейного распределения легирующей примеси в $p-n$ -переходе [14]:

$$\mathcal{E}_m = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_{Bi} - U_{Br}}{W_{p-n}}, \text{ или } U_{Bi} - U_{Br} = \frac{q \cdot \alpha \cdot W_{p-n}^3}{12 \varepsilon_0 \varepsilon_s} \quad (2.1)$$

Для $U_{\text{проб}} \approx 7$ В даёт: $W_{p-n} \approx 1200$ Å, $\alpha_{p-n} \approx 5,8 \cdot 10^{23} \text{см}^{-4}$. В расчёте с достаточным в данном случае приближением принималось значение контактной разности потенциалов $U_{Bi} \approx 1$ В. Отметим, что полученное значение градиента концентрации легирующей примеси в $p-n$ -переходе соответствует предельным значениям α_{p-n} , достигаемым для $p-n$ -переходов, полученных методом ионного легирования, рисунок 2.1 [46].

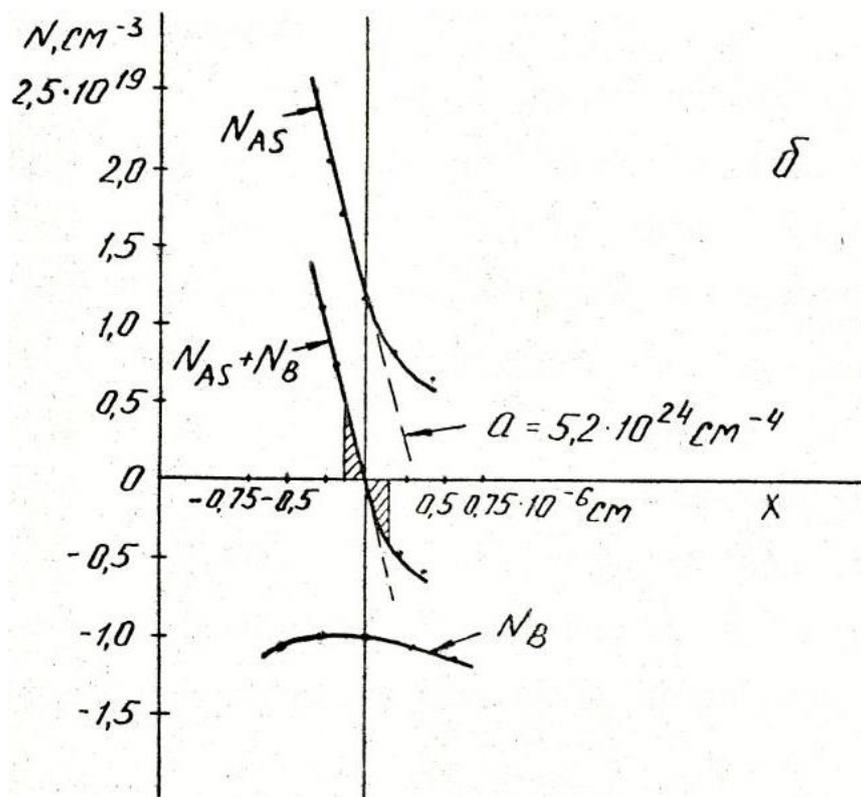


Рисунок 2.1 – Концентрационные профили мышьяка и бора в области ионнолегированного $p-n$ -перехода

Далее, из основного уравнения, описывающего распределение концентрации легирующей примеси в линейном диффузионном $p-n$ -переходе:

$$N_d - N_a = \alpha_{p-n} \cdot W_{p-n} \quad (2.2)$$

для граничного условия $N_d \rightarrow 0$ при $x = W_{p-n}/2$, окончательно получаем: $N_a = 3,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, что соответствует кремнию p -типа проводимости (КДБ) с удельным сопротивлением $0,03 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

В результате для проведения экспериментов по изготовлению и исследованию НВ диффузионных $p-n$ -структур выбран кремний марки КДБ с удельными сопротивлениями в диапазоне $(0,001 - 0,1) \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Температурный режим процесса диффузии мышьяка в кварцевой ампуле выбран из условия формирования в сильнолегированном кремнии $p-n$ -переходов с глубиной залегания не менее 2 мкм , чтобы нейтрализовать проблему получения малопроникающих омических контактов. Этому требованию удовлетворяют предельно жёсткие по величине температуры и длительности процесса режимы.

Для откачанной кварцевой ампулы критичной является температура $\sim 1200^{\circ}\text{C}$. В то же время повышение температуры диффузии свыше 1100°C слабо влияет на предельную растворимость мышьяка в кремнии. В результате для проведения экспериментов по получению НВ p - n -структур выбран режим диффузии As при температуре 1150°C .

2.2 Исследование процессов высококонцентрационной диффузии мышьяка

Структуры экспериментальных образцов диффузионных p - n -структур представлены на рисунке 2.2.

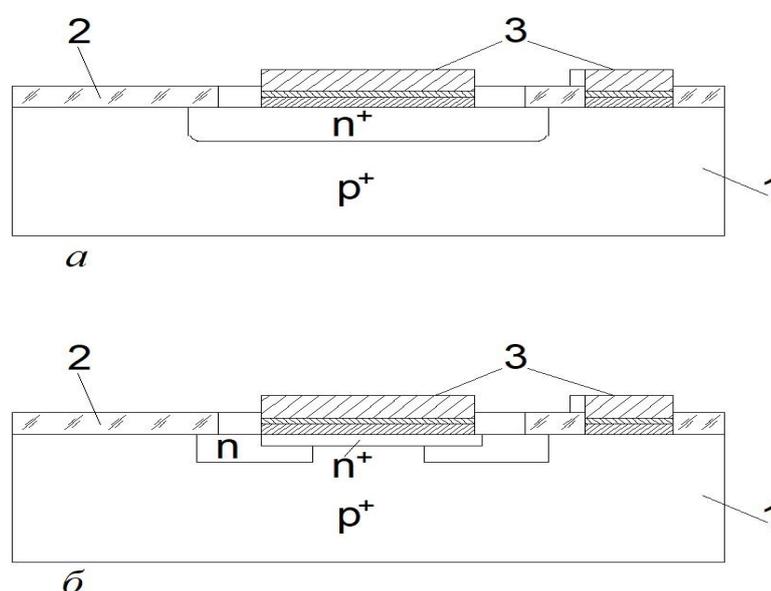


Рисунок 2.2 – Структуры экспериментальных образцов диффузионных p - n -структур: а – без охранного p - n -перехода; б – с охранным p - n -переходом (n - p^+); 1 – кремниевая подложка; 2 – диэлектрическая защита p - n -перехода; 3 – омические контакты

Полный цикл изготовления диффузионных НВ p - n -структур включал типовые планарные процессы: защитное окисление, фотолитографию по слою оксида кремния для вскрытия “окон” под диффузию и создание омических контактов к диффузионному слою и к базе [47, 48].

Эксперименты проводились на полированных кремниевых пластинах диаметром 42 мм и толщиной 250 мкм. Для проведения диффузионного отжига использовались кварцевые ампулы диаметром 55 мм с внутренним объёмом ~ 350

см³. Пластины кремния загружали плотным пакетом, помещая между ними окисленные кремниевые экранирующие пластины.

Так как при такой загрузке абсолютное, на уровне вандерваальсовских сил притяжения контактирование рабочих полированных пластин кремния друг с другом и экранирующими окисленными пластинами не достигается, пластины контактируют друг с другом точечным образом и реальный зазор между ними составляет десятки и сотни ангстрем, превышая размеры атомов легирующей примеси, пакетная загрузка никак не препятствует проникновению атомов испарённой легирующей примеси (As) между ними. Более того, в этом случае обеспечивается предельно равномерное распределение атомов As по поверхности легируемых пластин, соответственно – минимальный разброс электрических параметров *p-n*-переходов по площади пластин, что и подтвердилось далее при изготовлении экспериментальных и рабочих НВ *p-n*-структур. Отметим, что пакетная загрузка рабочих пластин – одно из важнейших достоинств способа безкислородной диффузии в эвакуированных ампулах сравнительно со способами диффузии в газовой фазе или из твёрдых источников. Помимо пакета рабочих и экранирующих пластин, в ампулу вплотную с пакетом помещали также две экранирующие окисленные кремниевые шайбы толщиной 5 мм. Вес загрузки поддерживался постоянным для всех экспериментов вне зависимости от количества рабочих пластин за счёт экранирующих шайб и количества буферных экранирующих пластин.

Что касается техники ампульной диффузии примесей, следует отметить также тот факт, что газодинамическое равновесие в разрежённом объёме кварцевой ампулы, помещённой в диффузионную печь, устанавливается практически мгновенно. Т.е. процесс диффузии протекает в квазиравновесных условиях, что обеспечивает высокую однородность распределения легирующей примеси и, соответственно, параметров диффузионного слоя по площади кремниевых пластин. Техника процесса ампульной диффузии As заимствована у предприятия «ЭЛМА», г.Зеленоград, применявшегося некоторое время при формировании “скрытого слоя” в производстве эпитаксиальных структур для биполярной

технологии, причём исключительно с низким уровнем поверхностной концентрации (концентрация As в диффузионном слое $N_s \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$, поверхностное сопротивление $\rho_s \approx 10 \text{ Ом/□}$) [44].

Не останавливаясь подробно на исследовании факторов, влияющих на воспроизводимость и управление процессами ампульной диффузии As в сильно легированный кремний с целью получения *p-n*-структур с туннельным пробоем с заданными параметрами – напряжением пробоя и глубиной залегания *p-n*-перехода, приводим только основные из них и связанные с ними расчёты и исследования.

Непосредственно перед процессом диффузии ампулу и загружаемые в неё кварцевые детали (кварцевые кассета и стаканчики для источника диффузии) тщательно очищали обработкой в плавиковой кислоте с отмывкой в деионизованной воде. Затем ампула и кварцевые детали отжигались при температуре 1200°C в потоке сухого кислорода в течение 30 минут. Для обеспечения воспроизводимости параметров диффузионных *p-n*-структур непосредственно перед загрузкой в ампулу кремниевые пластины подвергались обработке в разбавленной плавиковой кислоте ($\text{HF} : \text{H}_2\text{O} \rightarrow 1:10$) в течение 30 секунд для удаления в окнах под диффузию остаточного (естественного) оксида кремния. Немедленно после этой операции следовала операция кистевой мойки пластин в деионизованной воде с последующей сушкой на высокоскоростной центрифуге. После чего пластины в виде плотного пакета и источник диффузии без промедления загружались в кварцевой кассете в подготовленные к этому моменту ампулы. Полный остаточный зазор между пластинами в пакете составлял не более (300-350) мкм.

Загруженную кремниевыми пластинами и источником диффузии ампулу заваривали кислородно-водородной горелкой со стороны шлиф-пробки. Далее загруженную ампулу отжигали при температуре 300°C в течение 30 минут в НТ печи при непрерывном вакуумировании с остаточным давлением не более 10^{-3} Па и отпаивали от вакуумной системы. Затем в полую снаружи шлиф-пробку заливали холодную воду и ампулу без промедления помещали горячей частью вперёд в

диффузионную ВТ печь. После диффузионного отжига и извлечения ампулы из печи её немедленно охлаждали струёй холодной воды в области шлиф-пробки.

2.3 Поиск эффективного источника диффузии мышьяка

Величина давления пара легирующей примеси в реакторе (ампуле) и её воспроизводимость от процесса к процессу прямо влияют на электрические параметры и их воспроизводимость диффузионных *p-n*-переходов. Поэтому выбор источника диффузии, контроль и обеспечение воспроизводимости его свойств – одна из основных задач разработки технологии диффузии мышьяка [49].

На практике наибольшее распространение нашли способы диффузии в эвакуированной ампуле в неокисляющей среде с источником в виде легирующей примеси в элементарном виде [50, 51] и с источником в виде порошка кремния, насыщенного легирующей примесью до необходимой степени концентрации [52,53]. Так как для проведения типичных низкоконтрационных процессов требуются небольшие количества легирующей примеси в ампуле, использование источников в элементарном виде легирующей примеси считают неудобным по причине плохой воспроизводимости результатов. Кроме того, дефектность диффузионных структур, полученных с применением источника в виде элементарной примеси, оказывается обычно существенно выше, чем в иных случаях. Хорошие результаты даёт применение источников в виде легированного порошка или в виде легированных пластин полупроводника, однако, только до значений поверхностной концентрации (As) в диффузионном слое порядка 10^{19}см^{-3} [51].

В работе [38] представлен также способ приготовления источника диффузии As, названного эталонным, с концентрацией As 20 % атомных, по которому порошок (размер зёрен ~150 мкм) безпримесного поликристаллического кремния с чистотой 99,999 % и навеску As (тоже 99,999 %) помещают в двухполостную ампулу и отжигают в течение 1 ч. в двухзонной печи с уровнями температуры в зоне As 600°C и в зоне Si* – 1050°C. Спечённую двухфазную смесь Si*-As вновь измельчают до размеров зёрен ~150 мкм.

Разбавление эталонного источника до желаемой концентрации в нём As проводят также порошком поликремния (Si^*). Далее смесь, содержащую эталонный источник и разбавитель (Si^*), вновь помещают в специальную кварцевую ампулу, применяя весь комплекс необходимых технологических операций, и отжигают при температуре 1050°C в 50 ч. для обеспечения полной тепловой гомогенизации. В работе [44] для приготовления источника диффузии As с целью создания скрытого слоя в эпитаксиальных структурах смесь порошка кремния марки КДБ10 отжигали совместно с навеской кристаллического As (0,45 г. As : 60 г. Si) в эвакуированной ампуле в течение 20 часов при 1200°C . Полученный конгломерат (лигатура) измельчали в агатовой ступке и определённые весовые части его использовали для проведения диффузионных процессов. Уровень поверхностных концентраций As обеспечивался в данном случае порядка 10^{18}см^{-3} ($\rho_s \sim 10 \text{ Ом}/\square$).

Помимо двух рассмотренных источников диффузии As, применяют механическую смесь расплывённого As и безпримесного кремния. В этом случае снимается ограничение, связанное с количеством/весом источника. Причина невозможности здесь – неоднородность смешивания компонент источника. Распылённый As – уже недостаток этого метода, обусловленный хорошо выраженной способностью As, тем более расплывённого, окисляться [54].

С целью определения наиболее эффективного источника диффузии мышьяка в сильно легированный кремний в условиях эвакуированной ампулы, пригодного для формирования НВ диффузионных p-n-структур, исследованы несколько их вариантов:

- лигатура, приготовленная спеканием порошка кремния марки КДБ0.001 с навеской кристаллического мышьяка;
- источник в виде кристаллического мышьяка;
- комбинированный источник диффузии в виде навески кристаллического As и порошка сильно легированного бором кремния (КДБ0.001).

По опыту [44], с целью создания источника диффузии As, пригодного для формирования НВ диффузионных *p-n*-структур, исследована возможность достижения этой цели с помощью лигатуры, полученной спеканием в эвакуированной кварцевой ампуле навески кристаллического As (2 г.) с порошком сильнолегированного кремния марки КДБ0,001 (30 г.) при температуре 1200°C в течение 6 ч. Спечённую таким образом массу истирали в агатовой ступке до размеров зёрен ~ (150-200) мкм, тщательно перемешивали и порциями по (4÷6) г. использовали в экспериментальных диффузионных процессах. Контроль воспроизводимости параметров диффузионных слоёв, получаемых таким образом, проводили с помощью кремниевых пластин-спутников тоже марки КДБ0,001. Типичные значения ρ_s , измеренные на таких пластинах, располагались в диапазоне (0,5-1,5) Ом/□.

При проведении экспериментов с высококонцентрационной лигатурой проявились недостатки, отмеченные при обсуждении источника диффузии As в виде смеси двух компонент Si^{*}-As [38]. Например, разброс напряжения пробоя *p-n*-структур, изготовленных на основе кремния КДБ0,001 в пяти процессах, для которых навески лигатуры брали от исходного конгломерата (30 г.), составил ~15 %. Значительный разброс $U_{\text{проб}}$ зафиксирован также для значений ρ_s пластин-спутников в диффузионных процессах с использованием лигатуры, приготовленной в разное время. Обнаружено, что хранение лигатуры в течение нескольких суток, причём даже в условиях вакуума (~10 Па), также приводит к изменению её свойств.

Как подтверждает анализ, лигатура содержит мышьяк в двух различных состояниях: часть As продиффундировала в кремниевый порошок, часть конденсировалась на поверхности кремниевых частиц. Последнее подтверждается прямыми наблюдениями в момент вдвигания эвакуированной ампулы с загруженными экспериментальными пластинами и навеской лигатуры в диффузионную печь. Как только часть ампулы, в которой расположен кварцевый контейнер с лигатурой, попадает в зону с достаточно высокой температурой (> 300°C) наблюдается интенсивное образование бурых паров As и немедленное их

осаждение в виде плотной тёмной плёнки на ещё относительно холодном (вода в кармане шлиф-пробки) дне шлиф-пробки ампулы. Аналогичный перенос и осаждение As на различных внутренних участках ампулы имел место в момент извлечения ампулы после диффузионного отжига из диффузионной печи.

Принудительное охлаждение извлечённой ампулы в области шлиф-пробки, например, увлажнённой тканью или струёй испарённого жидкого азота, способствовало интенсивной конденсации As на охлаждаемых участках ампулы в виде плотной с металлическим блеском чёрной плёнки. Плёнка легко отслаивается от кварца. Вес её для указанного количества лигатуры составлял порядка (60-80) мГ. Спектральный анализ показывает, что это – действительно мышьяк. Причём, осадок на пробке – только часть несвязанного As. Значительная часть его конденсируется на других внутренних поверхностях ампулы и частично – на рабочих и вспомогательных пластинах кремния.

Пользуясь приближённой моделью диффузии примеси в полубесконечное тело при значении поверхностной концентрации $N_s = \text{const}$ и на основании допущения постоянства коэффициента диффузии As (D_{As} при $1200^\circ\text{C} \sim 7 \cdot 10^{-13} \text{см}^2/\text{с}$ [55]), количество атомов As (Q_{As}), продиффундировавшего в 5 г. кремниевого порошка лигатуры, можно оценить по формуле:

$$Q_{As} = 2S_p \cdot N_s \cdot \sqrt{D_{As} \cdot t / \pi}, \quad (2.3)$$

где S_p – площадь поверхности частиц порошка ($\sim 1000 \text{см}^2$).

Для $N_s = 2 \cdot 10^{21} \text{см}^{-3}$ [56], $T = 1200^\circ\text{C}$, $t = 6 \text{ч.}$, получаем $Q_{As} = 2,73 \cdot 10^{20}$ ат. Или в весовом выражении [57]:

$$m_{As} = Q_{As} \cdot Z \cdot A, \quad (2.4)$$

где $Z = 74,9$ а.е.м. – вес атомов As в атомных единицах, $A = 1,66 \cdot 10^{-24}$ г. – вес атомной единицы. Т.о. $m_{As} \approx 35$ мг.

При проведении типичного экспериментального процесса диффузии As ($T = 1200^\circ\text{C}$, $t = 2 \text{ч.}$, $D_{As} \sim 7 \cdot 10^{-13} \text{см}^2/\text{с}$) в объём ампулы из частиц лигатуры испаряется (экзодиффузия) только ~ 5 мГ As. Таким образом, при диффузии из источника в виде лигатуры с высоким содержанием As давление пара As в ампуле полностью определяется количеством кристаллического конденсата As (200...250 мг) на

кремниевых частицах лигатуры [49]. А это значит, что источник диффузии As, приготовленный по известной методике [44], практически аналогичен источнику в виде смеси измельчённого As и порошка кремния [38].

Исследована возможность получения НВ p-n-переходов в сильнолегированном p-кремнии диффузией из непосредственно кристаллического мышьяка в режиме: температура 1150°C, время 2 ч.

Для процессов диффузии с навесками As величиной 120, 180 и 300 мг получены результаты по параметрам ρ_s , x_j , $U_{проб}$, близкие данным для процессов с применением лигатуры, рисунки 2.3 - 2.5.

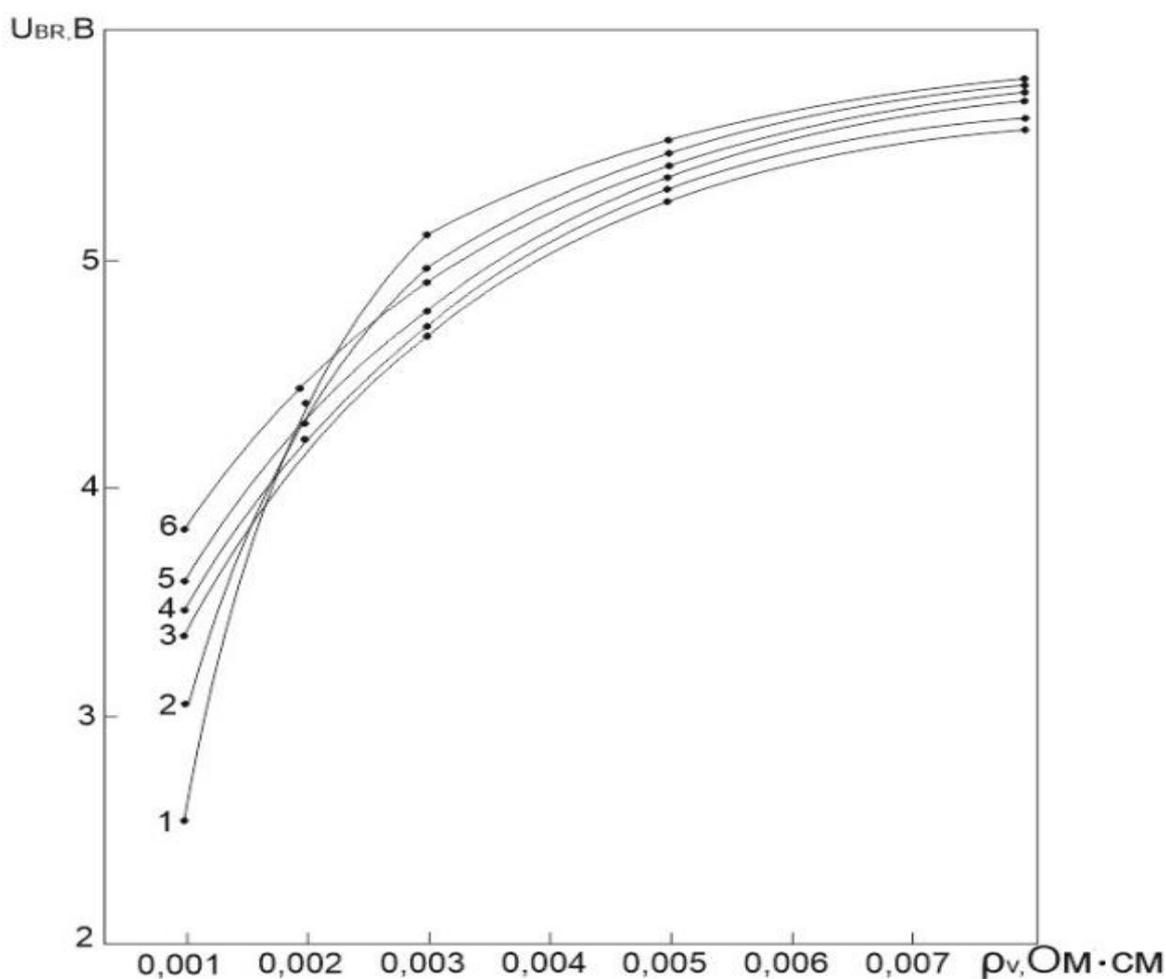


Рисунок 2.3 – Зависимость напряжения пробоя диффузионных p-n-переходов от удельного сопротивления кремния: 1 – As 120 мг; 2 – 180 мг; 3 – 400 мг + 5 г Si; 4 – лигатура; 5 – As 300 мг; 6 – As 400 мг + 5 г Si

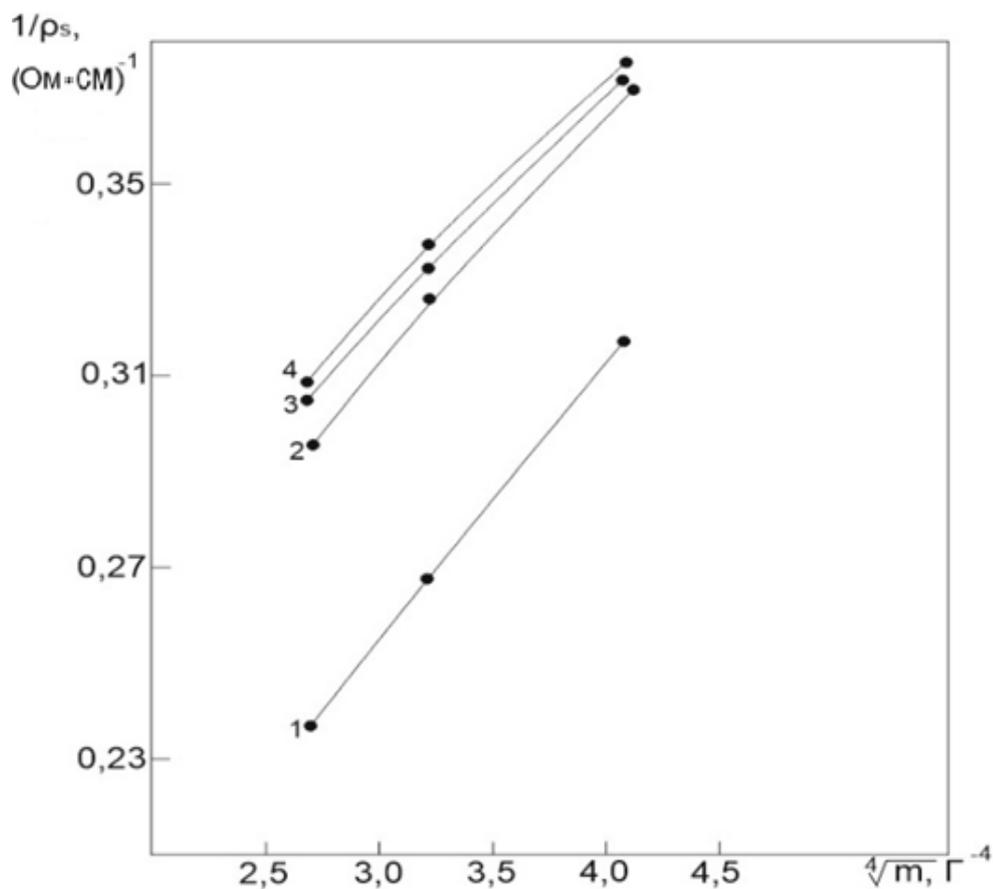


Рисунок 2.4 – Зависимость средних значений поверхностного сопротивления (ρ_s) диффузионного слоя от навески мышьяка (m) для разных значений удельного сопротивления (ρ_v) кремния: 1, 2, 3, 4 - ρ_v 0,002; 0,005; 0,008; 0,01 Ом·см

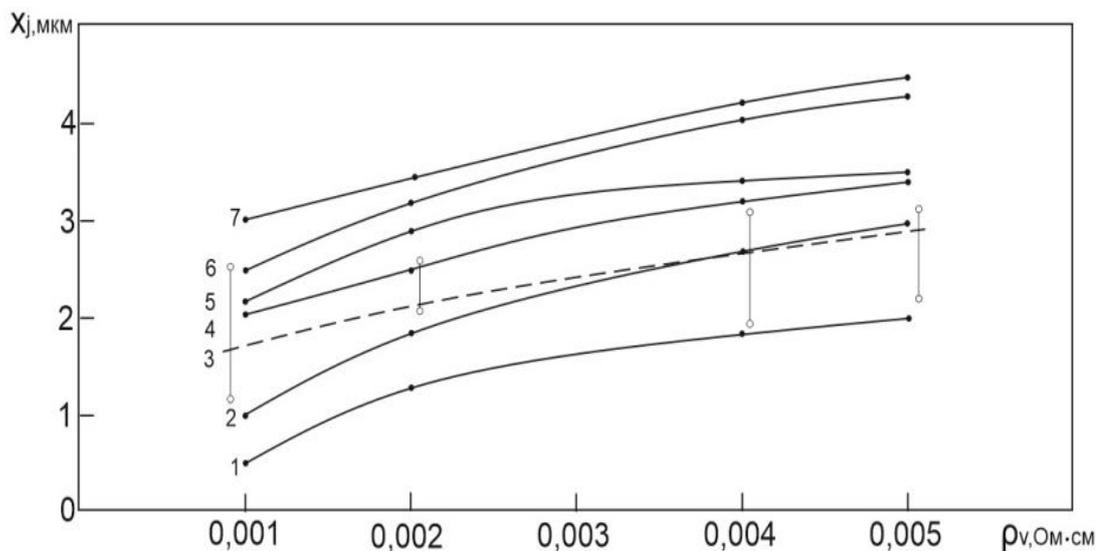


Рисунок 2.5 – Зависимость средних значений глубины залегания p - n -перехода (x_j) от удельного сопротивления (ρ_v) кремния: 1 – As 120 мг; 2 – 180 мг; 4 – 200 мг + 5 г Si; 3 – лигатура; 5 – As 300 мг; 6 – As 400 мг + 5 г Si, 2 ч.; 7 – As 400 мг + 5 г Si,

4 ч.

Параметры p - n -переходов при диффузии с навеской 60 мГ измерить не удалось. В области значений удельного сопротивления кремния 0,001... 0,002 Ом·см дисперсия $U_{\text{проб}}$ p - n -структур ($\Delta U_{\text{проб}}$) как от партии к партии, так и на отдельных пластинах для навесок As 120, 180 и даже 300 мГ значительно превышала допустимые значения, таблица 2.1.

Таблица 2.1 – Разброс напряжения пробоя p - n -переходов для разных источников диффузии мышьяка

ρ_v , Ом·см	$\Delta U_{\text{проб}}, \text{ В}$					
	Источник диффузии					
	As 120 мГ	As 180 мГ	As 300 мГ	Лигатура	As 200 мГ + 5 г Si	As 400 мГ + 5 г Si
0,001	1,23	0,67	0,54	0,25	0,10	0,08
0,002	1,17	0,50	0,83	0,37	0,15	0,18
0,003	0,81	0,28	0,35	0,30	0,18	0,16
0,005	0,30	0,23	0,37	0,32	0,23	0,18
0,008	0,54	0,40	0,41	0,47	0,33	0,24

Диффузионные слои в этом случае залегали на относительно малой глубине, рисунок 2.5 (кривые 1, 2). При измерениях напряжения пробоя наблюдалась неустойчивость пробоя и даже снижение величины $U_{\text{проб}}$ вплоть до короткого замыкания.

Полученные данные по величине поверхностного сопротивления для процессов с навесками As (m_{As}) 60...300 мГ (рисунок 2.6) достаточно точно описываются зависимостью вида $\rho_s^{-1} \sim m_{\text{As}}^{1/4}$, что согласуется с известными представлениями о том, что As при температурах выше 1000°C находится преимущественно в виде четырёхатомных молекул [54]. Эта зависимость может

представлять интерес при оценке давления пара As по известной формуле Менделеева-Клапейрона $P = n \cdot k \cdot T$, где p – давление газа, n – концентрация частиц в объёме; k - постоянная Больцмана [57].

Вместе с тем, дефектность легируемых пластин (разнообразные дефекты эрозионного характера и дислокационные треугольники на диффузионном поле, разветвлённые осаждения тонких кристаллитов As на защитном оксиде кремния экспериментальных планарных структур, о чём более подробно будет сказано ниже, уже для навесок As 300 мГ была значительно выше, чем в случае образцов, изготовленных в процессах диффузии с использованием в качестве источника лигатуру.

Полученные результаты можно объяснить тем, что при диффузии As в сильнолегированный кремний в условиях эвакуированной ампулы существенно возрастает роль встречной диффузии (испарения) легирующих элементов (в данном случае – бора) из подложки (КДБ), давление пара которого при температуре 1150 °С может достигать $5 \cdot 10^{-2}$ Па [58, 59]. И, что особенно важно, основной легирующей примеси – бора. В частности, образование дефектов на поверхности легируемых пластин непосредственно связано с испарением кремния и бора. Определённое участие в этом играет газообразный мышьяк.

Так как As по сравнению с бором обладает существенно меньшим коэффициентом диффузии в случае диффузии As, относительно мелкозалегающие p - n -переходы формируются при сопутствующем эффекте экзодиффузии (испарении) бора в области, где концентрация последнего отличается от равновесной. Как следствие этого, можно ожидать соответствующего изменения градиента концентрации As в области p - n -перехода и глубины залегания p - n -перехода, что определяет зависимость электрических параметров НВ p - n -переходов, формируемых в сильнолегированном кремнии p -типа проводимости диффузией мышьяка в условиях эвакуированной ампулы и предназначенных для НВ стабилитронов [48]. По-видимому, именно с этим связано некоторое различие напряжений пробоя ($U_{проб}$) НВ p - n -переходов, полученных диффузией из

кристаллического As (навеска 300 мГ) и из лигатуры с близким содержанием As (см. рисунок 2.3).

Чтобы уточнить представление об эффекте испарения бора, пластины кремния КДБ0,001, КДБ0,01 отжигали в откачанной до давления 10^{-3} Па ампуле при температуре 1150°C в течение 2 ч. Затем методом дифференциальной проводимости исследовали приповерхностные профили распределения бора. Измерения электрической проводимости осуществляли зондовым методом с точностью не хуже 1% (Приложение В).

Последовательное утонение образцов проводили на величину $\sim 0,1$ мкм травлением в “медленном” травителе $\text{NH}_4\text{F}:\text{CuSO}_4:\text{H}_2\text{O}$ (6 г.:4 г.:150 мл.) в течение 2 мин. Осаждённую в процессе травления медь растворяли в 70 %-ной HNO_3 . Погрешность оценки толщины стравливаемого слоя \rightarrow (20-25) %. Так как глубина проникновения зондов в кремний составляла по данным измерений методом угольных реплик на электронном микроскопе УЭМВ-100К (0,7-0,8) мкм с точностью порядка 20 %, полная погрешность методики оценивается величиной ~ 40 %. По результатам измерения проводимости и с помощью кривой Ирвина [60] зависимости удельного сопротивления *p*-кремния от концентрации бора строились распределения концентрации бора в исследуемых образцах, рисунок 2.6.

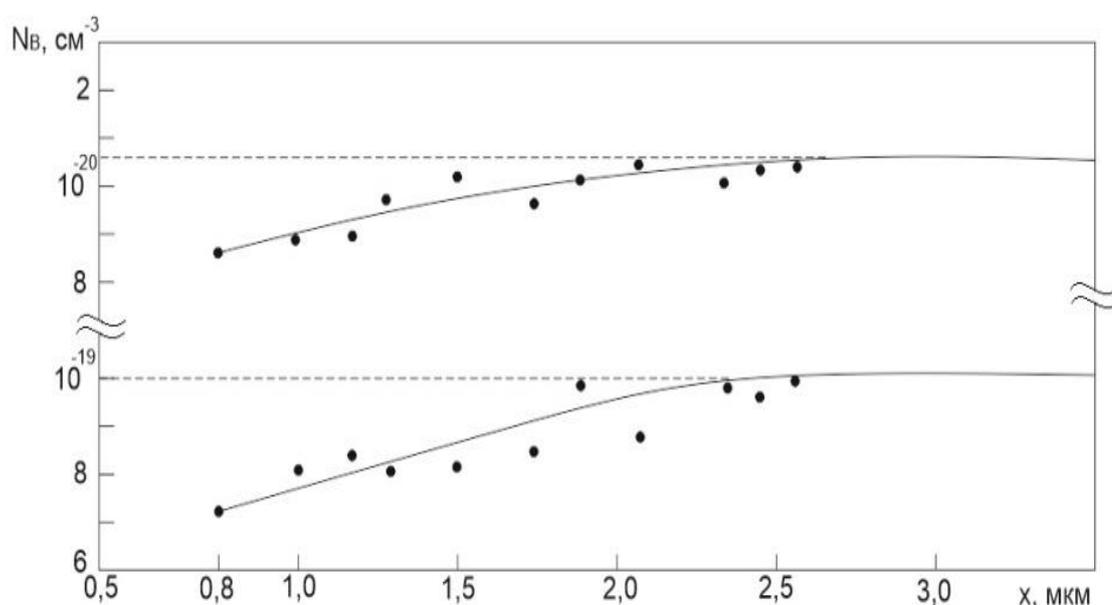


Рисунок 2.6 – Профили распределения бора в кремнии КДБ0,001 ($N_B = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) и КДБ0,01 ($N_B = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$), отожжённом при 1150°C в вакууме

Полученный результат свидетельствует о существенном отличии концентраций бора в приповерхностном слое толщиной (0,7-2,0) мкм отожжённого *p*-кремния от равновесных, т.е. в объёме.

Эффект испарения бора подтверждается также следующим прямым экспериментом. Высокоомные пластины кремния *n*-типа проводимости (КЭФ4,5) отжигали в эвакуированных ампулах совместно с порошками кремния КДБ0,001 ÷ КДБ0,008 (N_B от $1,1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ до $7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) в режиме 1150°C в течение 2 ч. В результате в КЭФ – кремнии получены диффузионные слои *p*-типа проводимости с поверхностным сопротивлением (ρ_s) в диапазоне от 8 до 1400 Ом/□. Причём, разбросы значений ρ_s по пластине и от пластины к пластине в отдельных партиях и от партии к партии не превышали 5% для всего исследованного диапазона значений ρ_s , рисунок 2.7.

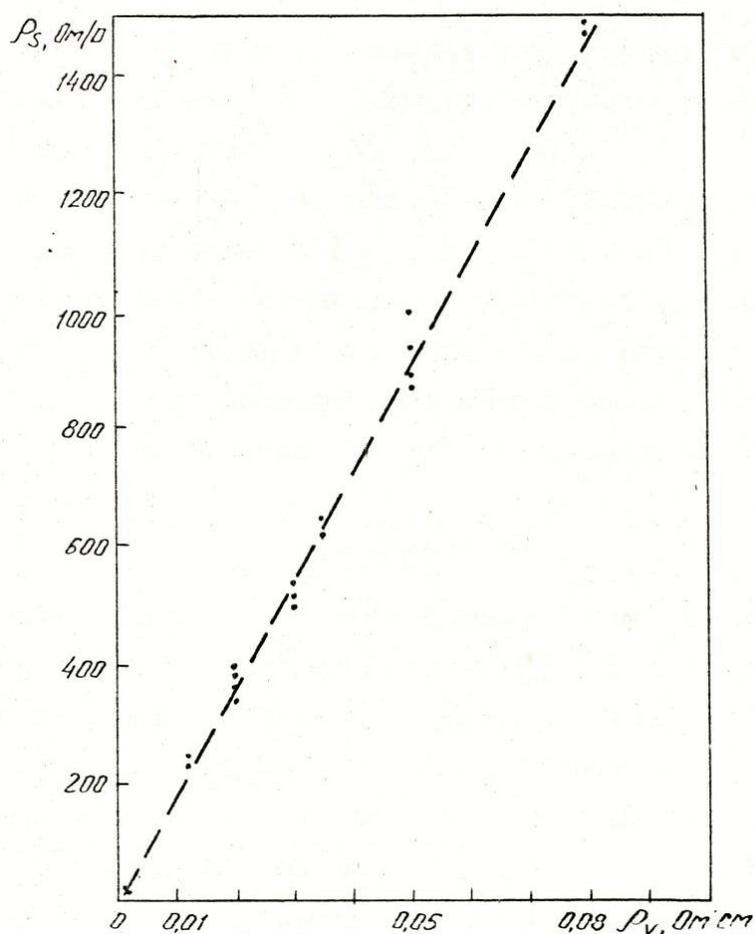


Рисунок 2.7 – Зависимость поверхностного сопротивления (ρ_s) диффузионного слоя в кремнии КЭФ4,5 от удельного сопротивления (ρ_v) кремниевого источника диффузии (КДБ0,001 ÷ КДБ0,08)

Полученные результаты хорошо коррелируют с данными основоположников промышленного использования ампульного способа диффузии легирующих примесей в кремний Армстронга и Даффи [35], показавшими, что диффузией в кремний из порошка кремния, легированного бором, фосфором, мышьяком, формируются диффузионные слои с поверхностной концентрацией (N_s), точно соответствующей базовой концентрации легирующей примеси (N_B) порошка кремния – источника диффузии в диапазоне N_B от 10^{17} до 10^{20} см⁻³.

Таким образом, порошки кремния, легированного до определённой концентрации бором, фосфором, мышьяком, могут быть использованы в качестве источников диффузии в условиях эвакуированного реактора.

На следующем этапе проведены эксперименты, в которых вместе с навеской кристаллического мышьяка в ампулу дополнительно помещали навеску порошка кремния (КДБ0,001) с дисперсностью порядка 200 мкм, используя её в качестве источника “пара” атомов бора, предназначенных для создания необходимого уровня противодавления, препятствующего испарению бора из кремниевой подложки.

Чтобы исключить испарение бора из подложки, дополнительный источник бора должен обеспечивать в свободном объёме ампулы (V_F) концентрацию бора (N_{BV}), близкую или превышающую концентрацию бора в подложке (N_B). Т.е. должно выполняться условие $N_{BV} \geq N_B$, где

$$N_{BV} = Sp \cdot \int_0^t J(0, t) dt / V_F, \quad (2.5)$$

где S_p – площадь частиц порошка кремния; $J(0, t)$ – поток атомов бора из кремниевых частиц дополнительного источника:

$$J(0, t) = D \cdot dN/dx \Big|_{x=0}. \quad (2.6)$$

Предполагая, что распределение атомов бора в кремнии при испарении описывается интегралом функции ошибок Гаусса [61], выражение (3.5) можно записать следующим образом:

$$N_{BV} = \frac{2 Sp}{VF} \cdot N_B \cdot \sqrt{Dt / \pi}. \quad (2.7)$$

Полученное соотношение (2.8) показывает, что процесс испарения базовой примеси (бора) из p -подложки можно контролировать, управляя технологическими факторами V_F , S_P для заданного режима диффузии мышьяка.

Полностью исключить испарение бора из сильнолегированной подложки (КДБ0,001...0,005), управляя только параметром S_P , достаточно сложно. Для этого в случае, например, $V_F \approx 100 \text{ см}^3$ потребовалось бы количество порошка кремния марки КДБ0,001 с дисперсностью $\sim 100 \text{ мкм}$ около 50 г. Более сильным фактором является параметр V_F . Для указанной дисперсности порошка площадь поверхности составляющих его частиц $\sim 1000 \text{ см}^2$. В этом случае для порошка из кремния КДБ0,001 имеем $N_{BV} \approx 10^{20} / V_F$. Реально для ампул диаметром 55 мм и длиной $\sim 22 \text{ см}$ свободный объём ампулы (V_F) можно уменьшить за счёт загрузки пластинами и сопутствующими деталями до $\sim 20 \text{ см}^3$. Если учесть, что испарение бора из подложек в условиях ампульной диффузии As не является свободным [62], то противодействие бора за счёт величины N_{BV} должно быть достаточным для ограничения перераспределения бора в приповерхностном слое подложки, рис. 2.8:

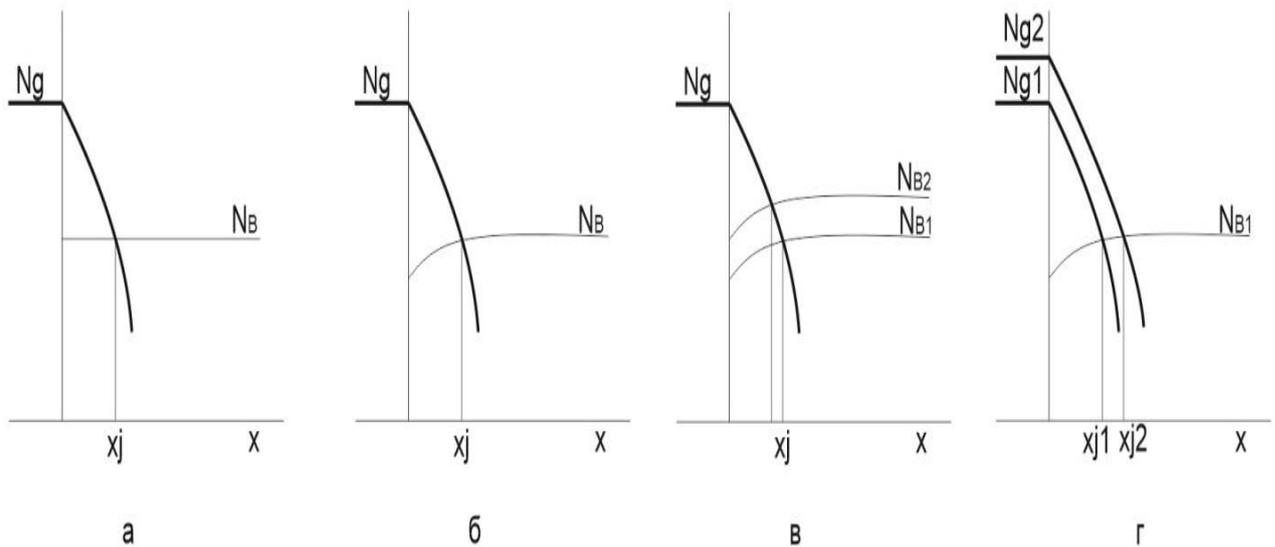


Рисунок 2.8 – Профили распределения базовой примеси – бора в приповерхностном слое кремния без учёта и с учётом эффекта испарения бора из кремния в процессе ампульной диффузии мышьяка: а) равновесный случай; б) случай испарения бора; в) случай испарения бора из подложек с разными уровнями легирования ($N_{B2} > N_{B1}$); г) диффузия As для разных уровней концентрации As (N_g) в ампуле ($N_{g2} > N_{g1}$)

Влияние эффекта испарения бора из подложки можно также снизить за счёт увеличения навески As. Учитывая выражение (2.8) и концентрационную зависимость коэффициента диффузии As [63], можно несколько сместить *p-n*-переход из обеднённой области вглубь подложки (рисунок 2.8 г) и, тем самым, обеспечить градиент концентрации As в *p-n*-переходе, близкий к равновесному.

В свою очередь, предел увеличения навески As в ампуле определяется допустимым уровнем дефектности планарных диффузионных структур и критическим для кварцевой ампулы при высокой температуре внутренним давлением. Эксперименты показали, что приемлемый уровень поверхностных дефектов диффузионных структур сохраняется вплоть до навесок As величиной порядка 500 мГ для ампул Ø55мм с внутренним объёмом ~ 350 см³ при заполнении объёма ампулы на ~ 70 %. При этом давление пара As в ампуле было порядка двух атмосфер.

В качестве рабочего выбран комбинированный источник диффузии (400 мГ As + 5 г Si), что позволило достаточно точно управлять концентрацией пара мышьяка в объёме ампулы и обеспечивать воспроизводимость результатов процесса диффузии As. Рисунок 2.9 иллюстрирует влияние количества As в ампуле (m_{As} , давление пара) на величину напряжения пробоя *p-n*-переходов.

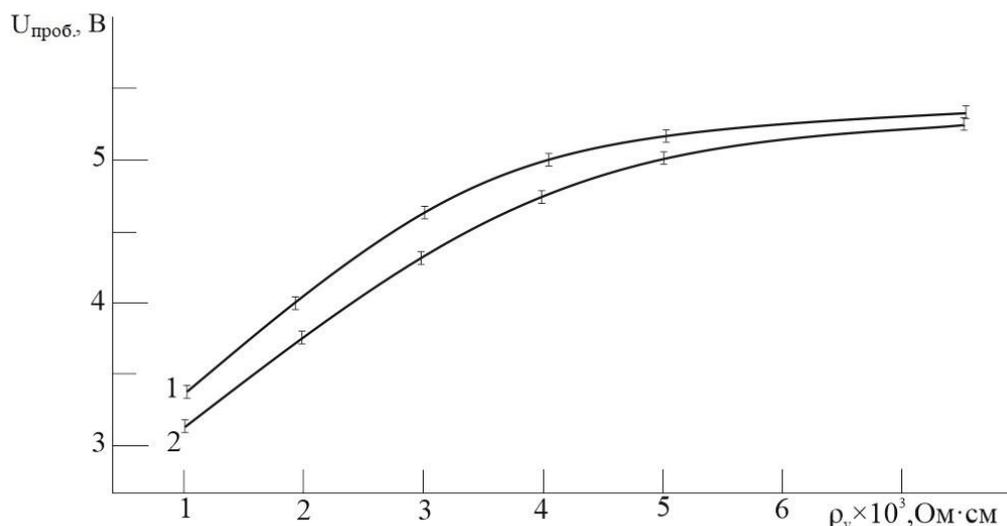


Рисунок 2.9 – Влияние количества мышьяка в ампуле на напряжение пробоя НВ *p-n*-переходов: 1, 2 – источники соответственно 200 мГ и 400 мГ As + 5 г кремния

Разница значений $U_{\text{проб}}$ для случаев диффузии с навесками As 200 и 400 мГ составляет $\sim (0,1 \div 0,15)$ В в диапазоне ρ_v $(0,001 \div 0,01)$ Ом·см. Наблюдаемое изменение $U_{\text{проб}}$ в зависимости от давления пара As (P_{As}) в ампуле вполне согласуется с показанными выше данными по влиянию $m_{\text{As}}(P_{\text{As}})$ на глубину залегания p - n -переходов (см. рисунок 2.5).

2.4 Дефекты на планарных диффузионных p - n -структурах

Существенным в исследовании и разработке процесса диффузии As в эвакуированном реакторе (метод закрытой трубы) оказывается изучение факторов / причин дефектообразования на поверхности легируемых планарных структур и определение эффективных мер по предотвращению / ограничению этих явлений. Чтобы дать наглядное представление о характере и угрозе образования таких дефектов, ниже представлены фото-образцы таких дефектов. Из этого следует необходимость принятия неординарных мер по предотвращению образования этих дефектов на поверхности легируемых мышьяком планарных p - n -структур.

В отличие от известных технологий создания эпитаксиальных структур со скрытым слоем, включающих процесс ампульной диффузии As в слаболегированный кремний (КЭФ4.5, $N_b \sim 10^{14} \text{см}^{-3}$), т.е. низкоконтрационный процесс, высококонтрационный процесс формирования p - n -переходов в сильнолегированном кремнии ($N_b \sim 10^{20} \text{см}^{-3}$) приводит к серьёзной проблеме образования различного рода поверхностных дефектов, например, точечных осадений As в виде треугольных выступов, соответствующих кристаллографической ориентации кремния (111), эрозии поверхности кремния, бесформенных осадений, рисунки 2.10 а, б, в.

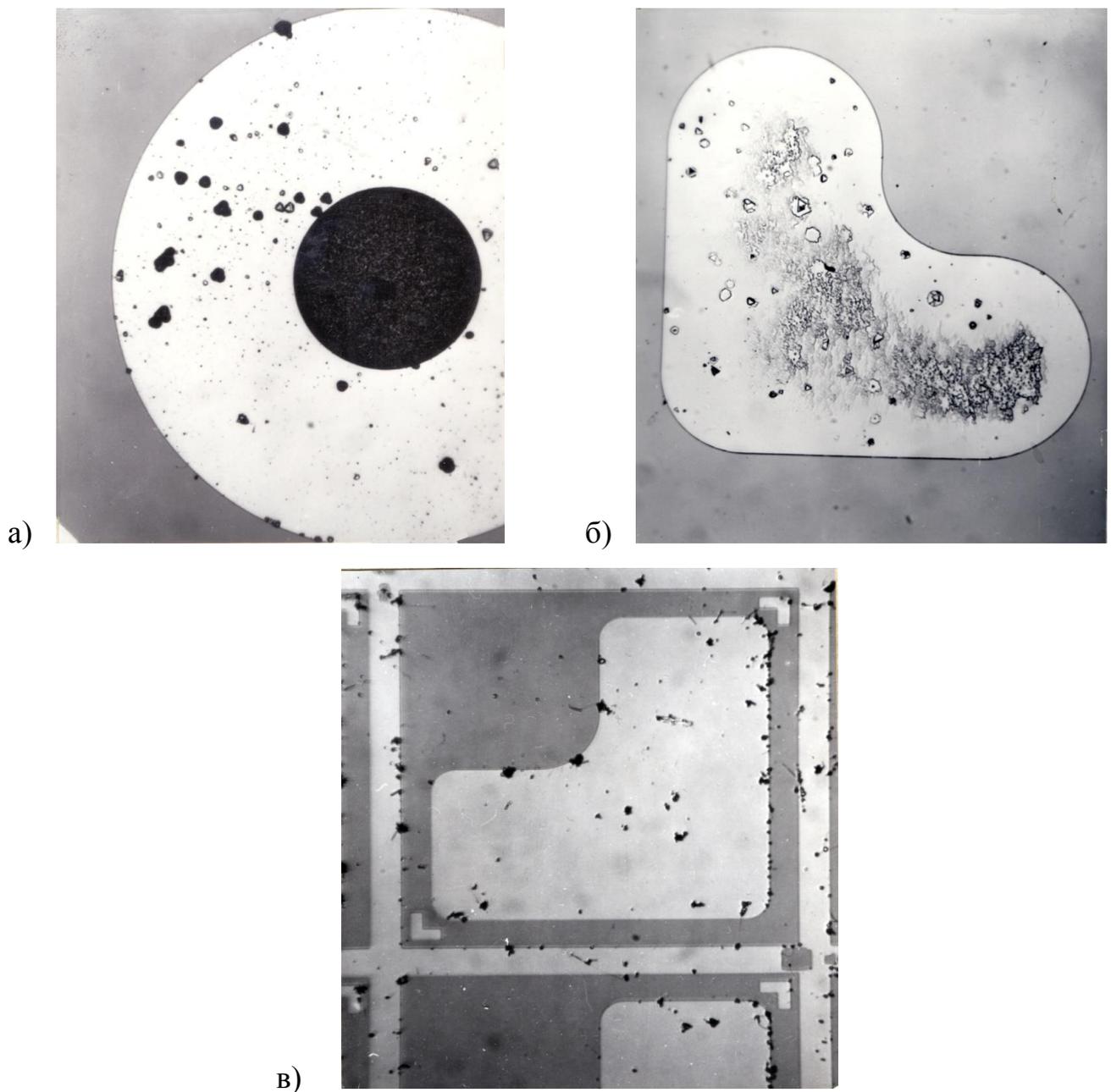


Рисунок 2.10: а – Осаждения мышьяка дислокационного характера в виде треугольных выступов;
 б – Осаждения мышьяка и эрозия поверхности кремния;
 в – Бесформенные осаждения мышьяка

Наблюдаются характерные дефекты в виде тёмных треугольных выступов высотой до двух мкм и светлые треугольники, не выступающие над поверхностью пластин, по-видимому, дислокационной природы (рисунок 2.10 б). Оценка высоты треугольных выступов проводилась по данным измерений длины тени, образующейся после напыления под определённым углом (20°) хрома на

исследуемые образцы, с помощью фотоотсъёма при заданном увеличении. Как и следовало ожидать, с позиций теории эпитаксии, повышение концентрации As в ампуле (процессы с навесками As 400 и 500 мГ) приводит к росту, как по количеству, так и по размерам, дефектности на экспериментальных планарных структурах.

Наибольшую опасность представляют дефекты в виде дендритных осадений мышьяка, обладающих электрической проводимостью, что может приводить к повышению токов утечки и даже закорачиванию *p-n*-структур рисунки 2.11, 2.12.



Рисунок 2.11 – Дендритные осадения металлоидного мышьяка

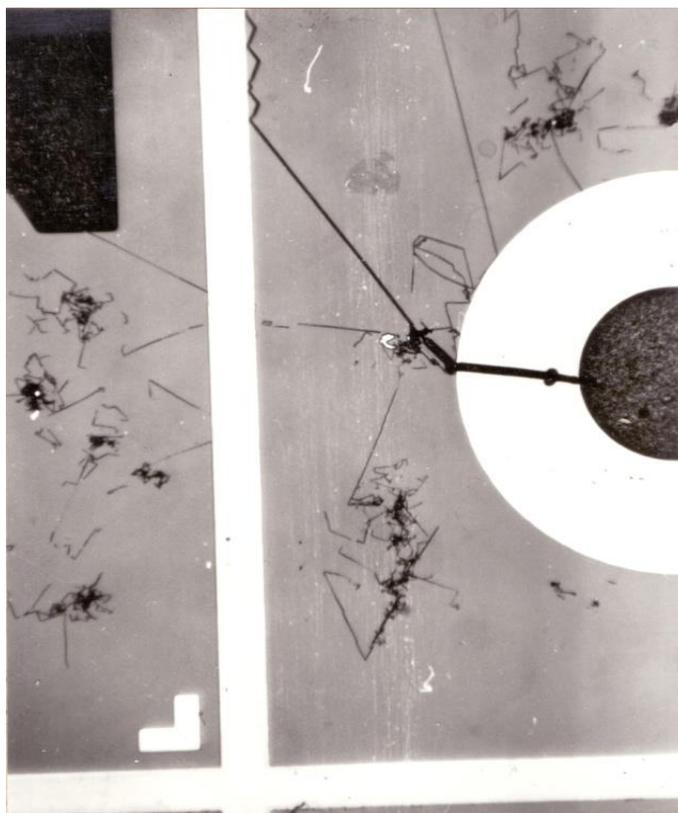


Рисунок 2.12 – Закорачивающие дендритные осаждения металлоидного мышьяка

Механизмы образования многих поверхностных дефектов при диффузии по “методу закрытой трубы” можно объяснить с позиций процесса эпитаксиальной кристаллизации. Действительно, как и при протекании типичного эпитаксиального процесса, в эвакуированном объеме загруженной кварцевой ампулы во время ВТ процесса диффузионного отжига происходят испарение и перенос основных элементов процесса As, В, а также и Si, из источника диффузии и, собственно, из легируемых кремниевых пластин, внедрение As в кремний и осаждение As на поверхности планарных структур. Испарение атомов Si приводит к эрозии поверхности легируемых пластин в окнах под диффузию в защитном оксиде кремния.

В зависимости от температурных условий и движения потоков частиц в ампуле на кремниевых подложках при конденсации атомов Si из паровой фазы происходит своего рода локальный эпитаксиальный рост. Скорость образования двумерных зародышей в процессе эпитаксии (R_n) определяется концентрацией

кремния в паровой фазе (N_{Si}), температурой и зависит от свободной энергии образования зародышей (ΔG) [61]:

$$R_n \approx N_{Si} \exp(-\Delta G/kT). \quad (2.8)$$

Необходимое условие формирования типичного эпитаксиального слоя с регулярной структурой – высокая скорость образования двумерных зародышей. Для этого необходима высокая концентрация пара кремния (N_{Si}) и высокая температура конденсации (T). Уровень температуры порядка (1100-1150)°С, что характерно для диффузии по “методу закрытой трубы”, т.е. в нашем случае, в технологии эпитаксии считается низким.

Оценим концентрацию пара кремния (N_{Si}), соответствующую выбранным условиям диффузии As в эвакуированной ампуле для формирования НВ планарных р-п-переходов: площадь испарения $S_{Si} \approx 1000 \text{ см}^2$, температура $T = 1150^\circ\text{C}$, время $t = 2 \text{ ч.}$, начальное давление $P_V \approx 10^{-3} \text{ Па}$, свободный объём $V_F \sim 75 \text{ см}^3$. Воспользуемся данными работы [61, 58] по скорости испарения Si в условиях ВТ и низкого давления: $0,05 \text{ мг}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$. При этих условиях в объём ампулы испарится около 10^{-2} г. кремния. В пересчёте на концентрацию это составит $\sim 2,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. В действительности концентрация пара Si в ампуле будет ниже, т.к. испарение в наших условиях нельзя рассматривать, как свободное, поскольку давление остаточной атмосферы в виде паров As в данном случае намного выше уровня 1 Па, являющегося одним из условий такого испарения [62].

Таким образом, концентрация паров Si, также как и уровень температуры для процесса диффузии As в ампуле не удовлетворяют требованиям “нормальной” эпитаксии. В результате такой квазиэпитаксии на легируемых мышьяком по ампульному методу кремниевых подложках происходит не формирование осадочного регулярного слоя Si, а рост разнообразных кристаллических дефектов. В данном случае присутствие в ампуле больших концентраций As ещё больше способствует процессам дефектообразования.

Гипотезу эпитаксиального механизма дефектообразования при высококонцентрационной диффузии As в эвакуированной ампуле можно подкрепить, сопоставляя микрофотографии типичных эпитаксиальных слоёв,

приведённые, например, в обзоре по эпитаксии [61], и микрофотографии характерных дефектов и отдельных участков планарных p-n-структур, полученные при исследовании диффузии As в эвакуированной ампуле с целью получения качественных НВ p-n-структур и обеспечения воспроизводимости их электрических параметров.

Типичные дефекты при увеличении количества As в источнике диффузии – дефекты в виде нитевидных, разветвлённых структур на диффузионном поле, но в основном на слое защитного оксида кремния (см. рисунки 2.11, 2.212). Исследование этих дефектов с помощью обычного тестера и двух тонких зондов показало, что такие образования обладают хорошей электропроводностью. Удалить эти дефекты с помощью гидромеханической обработки на установке кистевой мойки не удаётся.

На основании электрических измерений и исследования на микроскопе NU-2E при увеличении до 2000 крат, а также сопоставления с описанными в литературе кристаллическими образованиями, в частности, наблюдаемыми при пересублимации арсенида галлия (GaAs) в эвакуированных кварцевых ампулах [64], сделано заключение, что рассматриваемые дефекты есть ни что иное как металлоидные кристаллиты мышьяка.

Значительная зачастую протяжённость таких кристаллитов до (20-30) мкм указывает на то, что образование их происходит уже на начальных стадиях диффузионного отжига. Механизм образования такого рода дефектов – гетероэпитаксия с очень большими скоростями движения эпитаксиальных образований по поверхности SiO_2 и Si. Зарождению этих нитевидных дефектов способствуют различного рода механические нарушения поверхности планарных структур – царапины, растравы SiO_2 , инородные частицы. В свою очередь. Относительно крупные нитевидные дефекты, так же как и описанные выше тёмные выступы, при последующих операциях изготовления планарных p-n-структур: защиты фоторезистом, металлизации (напыление слоёв Ti, Ni), гальванического локального золочения и стравливания “лишних” слоёв контактной системы Ti-Ni-

Au, приводили к дефектам на области диффузии типа ложных высаживаний Au и растратам защитного оксида кремния.

Выводы об эпитаксиальном механизме дефектообразования при диффузии As в эвакуированной ампуле согласуются с данными работы [68] по ампульной диффузии фосфора. В работе [65] описан также возможный механизм эрозии кремния в процессе вакуумной диффузии в него фосфора при температурах, превышающих температуру эвтектики в системе Si – P, т.е. 1030°C. Предположено, что в условиях диффузии при 1150...1200°C фосфор растворяется в Si с образованием на отдельных участках кремния эвтектического сплава, который может частично испаряться со скоростью испарения Si, или частично затвердевать на этапе последиффузионного охлаждения. В результате поверхность Si эрозируется. Очевидно, что подобный механизм можно рассматривать при анализе механизмов дефектообразования в процессе диффузии As в Si в эвакуированной ампуле.

В рассматриваемом случае высококонцентрационной диффузии As дефекты эрозионного характера и дислокационные треугольники на диффузионном поле, характерные для диффузии в вакууме, опасности не представляют. И даже способствуют формированию качественного омического контакта. Опасны проводящие кристаллические осадки металлоидного As.

Таким образом, в случае ампульной диффузии As в Si следует различать два основных механизма дефектообразования. Первый из них связан с переносом и взаимодействием с планарными структурами легирующей примеси As, второй – с испарением, переносом и эпитаксиальной конденсацией кремния. Предотвращение образования дефектов эпитаксиального характера возможно теми же способами, что и в технологии классической эпитаксии, т.е. совершенствуя технологии механической и химической обработки/очистки оснастки (кварцевые ампула, кассета для загрузки пластин и стаканчики для источника диффузии) и загружаемых в ампулу кремниевых пластин и вспомогательных деталей (окисленных буферных кремниевых пластин и экранирующих окисленных кремниевых шайб), а также оптимизируя количество навески мышьяка.

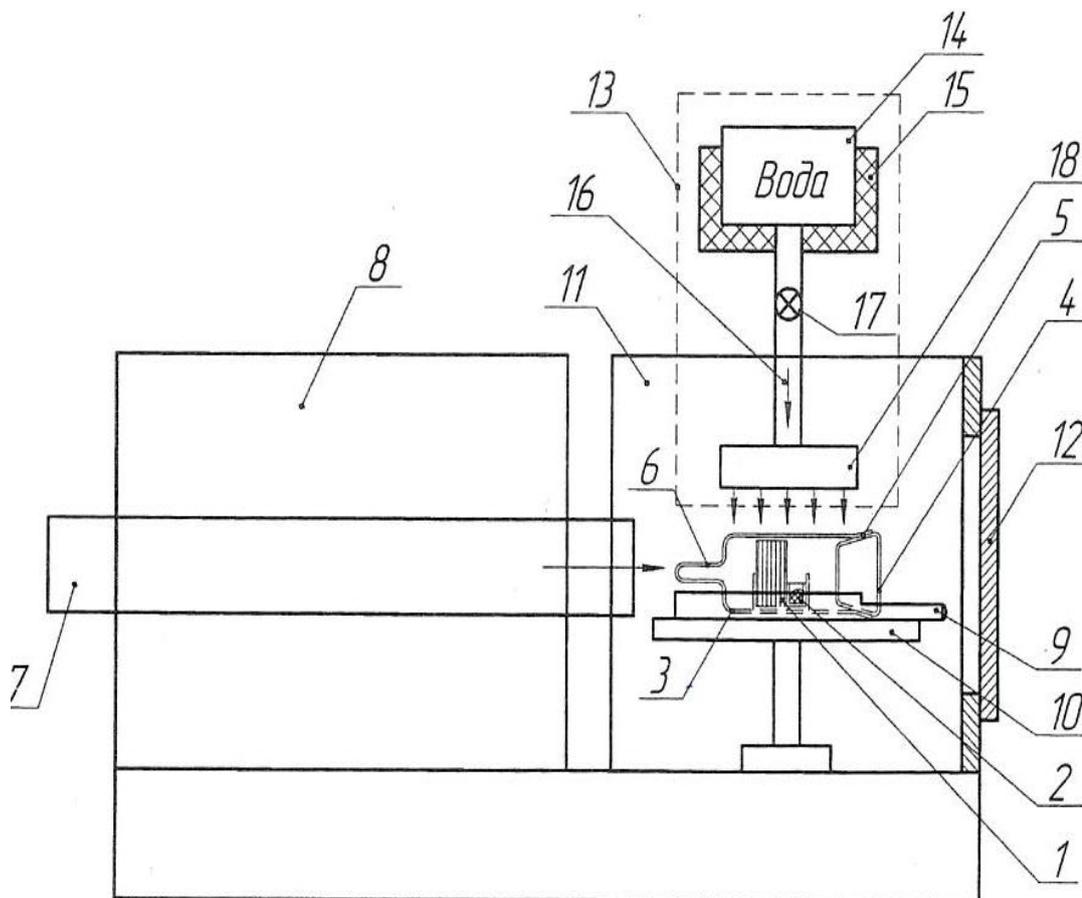
В то же время можно представить, по крайней мере, ещё два механизма дефектообразования на планарных структурах, обусловленных присутствием в ампуле As в кристаллическом виде. Один из них “работает” непосредственно после завершения диффузионного отжига, на стадии, когда извлечённая из диффузионной печи ампула остывает. При этом, если не предпринимать специальных мер, свободный охлаждающийся As осаждается на кварцевой оснастке, вспомогательных деталях, внутренней поверхности ампулы и частично – на планарные структуры. Последний эффект в основном и приводит к образованию на планарных структурах различных, обычно бесформенных дефектов-осаждений.

Удалить такие дефекты полностью часто не удаётся – ни обдувом сжатым воздухом, ни кистевой отмывкой. Так как технология одностадийной ампульной диффузии As исключает возможность радикальной последиффузионной очистки планарных p-n-структур по способу стравливания дефектного SiO₂ с последующей его заменой на второй стадии диффузии – перераспределении легирующей примеси в окислительной среде, применён способ контролируемого последиффузионного осаждения As на внутренней поверхности кварцевых ампул [66, 67].

Главный фактор, которым можно контролировать механизм осаждения As на планарных структурах, - оптимизация количества As в ампуле. С одной стороны количество As должно обеспечивать достижение максимальной поверхностной концентрации As при диффузии в сильнолегированный кремний, с другой – количество As должно быть по возможности минимальным, чтобы ограничить процессы дефектообразования. Именно исходя из этого, были построены эксперименты по количественному составу выбранного составного источника диффузии (As + порошок кремния КДБ0,001).

Кроме того, для исключения осаждения As на рабочие пластины ампулу после диффузионного отжига охлаждали водой, начиная с области шлиф-пробки. Затем, после (15-20) сек. охлаждения пробки проводилось общее охлаждение ампулы водой не менее 5 мин., что способствовало осаждению преобладающей части пара As на внутренней поверхности ампулы.

На рисунке 2.13 представлена схема устройства для последидиффузионного охлаждения ампул с легированными пластинами:



Рисункок 2.13 – Схема устройства для последидиффузионного охлаждения ампул с легированными пластинами: 8 – диффузионная печь, 7 – кварцевая труба, 11 – скафандр для загрузки / выгрузки кварцевых ампул, 5 – загруженная кремниевыми пластинами герметичная кварцевая ампула, 15 – контейнер с холодной водой (14), 17 – кран для включения / отключения воды, 18 – головка “душа”

Ещё один механизм образования дефектов, связанный с переносом As, но не столь очевидный, как рассмотренные выше, имеет место на начальной стадии диффузионного отжига.

Температура испарения кристаллического As при давлении окружающей среды порядка 10^{-2} Па составляет $\sim 250^\circ\text{C}$ [68]. В ампуле, вдвигаемой в диффузионную печь при температуре 1150°C , нагрев задней части с шлиф-пробкой несколько отстаёт от прогрева её передней части, в которой находится

кристаллический As. В результате во время вдвигания загруженной ампулы в диффузионную печь наличествуют процесс испарения As, проявляющийся в виде бурых паров As, и осаждение As на дне относительно холодной шлиф-пробки. При этом существует вероятность также и частичного осаждения As на ещё не прогретых рабочих пластинах с последующим его реиспарением по мере общего нагрева ампулы и её содержимого. Отдельные атомы As или их скопления могут и далее удерживаться на легируемых пластинах, непосредственно инициируя образование поверхностных дефектов, либо создавая зародыши, которые уже в процессе диффузионного отжига могут стать центрами эпитаксиальной кристаллизации мышьяка.

С целью предотвращения образования поверхностных дефектов по указанному механизму, перед введением загруженной ампулы в диффузионную печь её нагревали в НТ печи при температуре 250°C, т.е. ниже температуры испарения As. Затем в специальную внешнюю полость шлиф-пробки заливали ~ 70 мл холодной воды. После этого ампулу без промедления вдвигали в рабочую зону диффузионной печи. И пока воды в шлиф-пробке происходило испарение воды вдоль ампулы существовало две разнотемпературные зоны. В результате повышалась вероятность конденсации большей части As на начальной стадии диффузионного отжига на относительно холодной внутренней стенке пробки, а не на рабочих пластинах [69].

Обычно при выполнении всех требований к подготовке пластин и вспомогательных деталей к процессу, к операциям загрузки, вакуумирования и герметизации ампул, к операциям преддиффузионного и диффузионного отжигов, контролируемого охлаждения извлечённых из диффузионной печи ампул, поверхность кремниевых пластин в области диффузии приобретает характерную однородную шероховатость, напоминающую поверхность апельсиновой корки, либо – апельсиновую корку с обрамлением в виде, свободных от осадений террас, рисунки 2.14, 2.15.

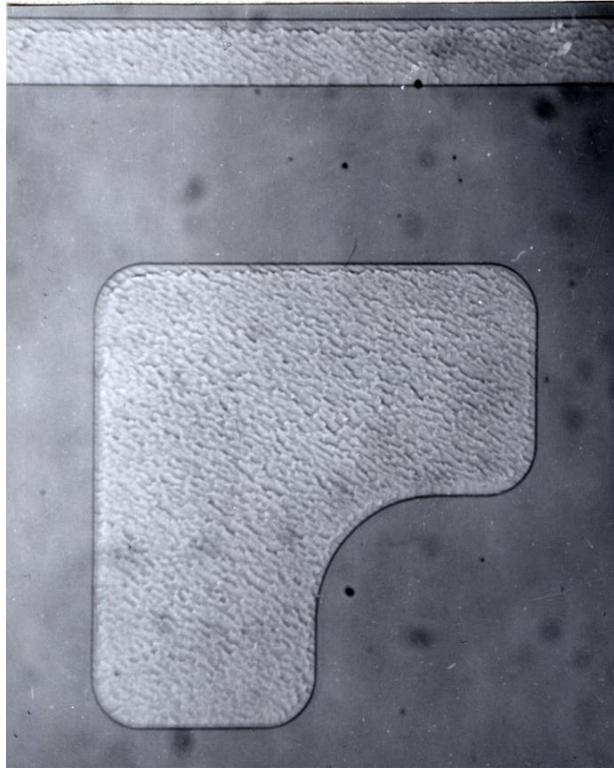


Рисунок 2.14 – Дефекты в виде апельсиновой корки

В некоторых случаях можно было наблюдать рельеф диффузионной поверхности в виде ориентированных террас, что также соответствует механизму эпитаксиального наращивания, рисунок 2.15.

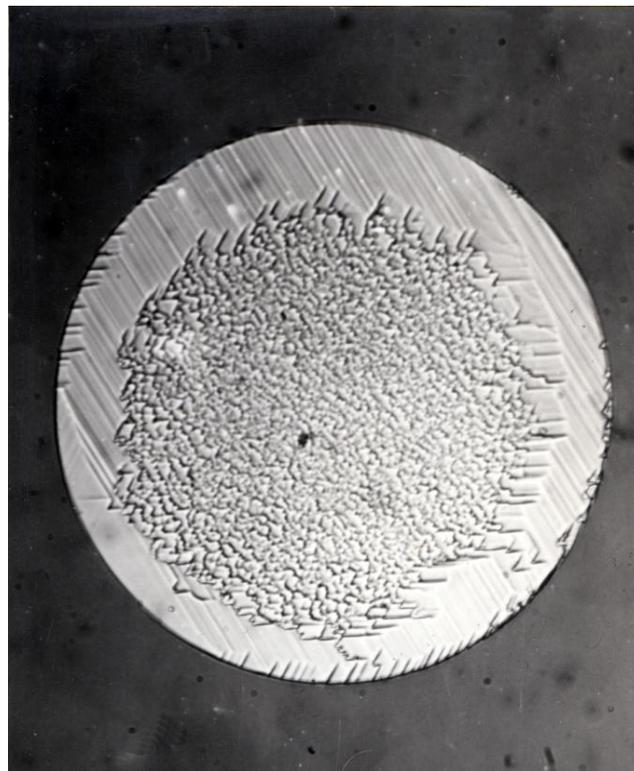


Рисунок 2.15 – Дефекты в виде апельсиновой корки с обрамлением террасами

Можно отметить, что создание развитой текстуры поверхности легируемых мышьяком областей кремния способствует улучшению адгезии и снижению контактного сопротивления омических контактов к низковольтным кремниевым р-п-структурам.

Изредка в экспериментах по диффузии мышьяка в сильнолегированный кремний отмечалось появление на защитном оксиде кремния особого образования, окраска и форма которого соответствуют так называемым цветкообразным кристаллическим дефектам, характерным при диффузии фосфора, сурьмы и особенно бора (P, Sb, B) методом “открытой трубы” [70], рисунок 2.16:



Рисунок 2.16 – Цветкообразный кристаллический дефект в защитном оксиде кремния

Такого рода кристаллические дефекты могут нейтрализовать защитный эффект диэлектрической защиты р-п-структур. Предположительно природа таких дефектов связана либо с остаточными точечными загрязнениями на поверхности кремния, на который наносится слой защитного оксида, либо с частицами кварца, осаждающимися на поверхности планарных структур при проведении процессов в “открытой трубе” из-за так называемого “раскварцовывания” реактора в результате длительного его использования. Последнее к диффузии в “закрытой трубе”, т.е.

кварцевой ампуле, не относится, т.к. процесс в ампуле носит разовый характер – ампулу разрушают после процесса для извлечения из неё легируемых пластин.

Тем не менее, столкновение с цветкообразным дефектом при проведении процессов диффузии As в ампуле позволило предложить способ глубокой заключительной очистки поверхности кремниевых планарных структур, путём её кратковременного окисления в сухом кислороде с последующим удалением тонкого оксида кремния вместе с предполагаемыми остаточными загрязнениями [71], который нашёл применение, в частности, при разработке термокомпенсированных стабилитронов повышенной стабильности.

2.5 Барьерные свойства остаточного оксида кремния при формировании *p-n*-переходов диффузией мышьяка

Результаты и воспроизводимость процессов диффузии в мышьяка в условиях эвакуированной ампулы существенно зависят от наличия и свойств сверхтонкого слоя естественного (остаточного) оксида кремния ($\text{SiO}_{2\text{ест.}}$) на поверхности легируемых пластин. Наличие даже, казалось бы, незначительного по толщине $\text{SiO}_{2\text{ост.}}$ приводит к росту величины напряжения пробоя диффузионного *p-n*-перехода, что весьма нежелательно при создании технологии низковольтных диффузионных *p-n*-структур. Для стабилизации и нейтрализации этого эффекта в технологии диффузии в эвакуированной ампуле непосредственно перед загрузкой в ампулу проводится кратковременная обработка (декапировка) кремниевых пластин чистой или разбавленной плавиковой кислотой ($\text{HF:H}_2\text{O}$ 1:10), буферным раствором $\text{HF:NH}_4\text{F:H}_2\text{O}$, или раствором $\text{HF:HNO}_3:\text{H}_2\text{O}$. Обычно продолжительность декапировки (30-40) с. выбирают в расчёте на предполагаемую толщину $\text{SiO}_{2\text{ест.}}$ 40 Å, ниже которой наличие SiO_2 на кремнии визуально не определяется.

Однако даже тщательное химическое дотравливание $\text{SiO}_{2\text{ест.}}$ не всегда оказывается эффективным. Во-первых, свежепротравленная поверхность Si немедленно взаимодействует с кислородом окружающей среды, образуя оксид кремния. Во-вторых, при герметизации вакуумируемой загруженной кварцевой ампулы кислородно-водородной горелкой происходит трудно контролируемое

подкисление кремниевых пластин вследствие лучевого воздействия на пакет загруженных в ампулу кремниевых пластин. В результате, как показали наши эксперименты, в отдельных случаях недотравленные островки $\text{SiO}_{2\text{ост.}}$ могут приводить даже к разрывам фронта диффузии мышьяка, рисунок 2.17:

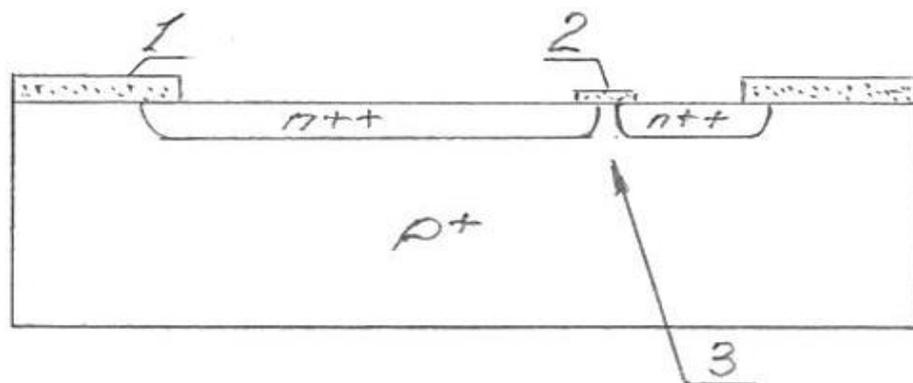


Рисунок 2.17 – Модель фронта диффузии мышьяка при наличии недотравленного оксида кремния: 1 – защитный оксид кремния; 2 – остаточный оксид кремния; 3 – разрыв фронта диффузии мышьяка

Поэтому к операции герметизации загруженных ампул заваркой кислородно-водородной горелкой предъявляются особые требования по скорости / времени заварки шлиф-пробки.

Вообще о свойствах $\text{SiO}_{2\text{ост.}}$ известно не очень много, т.к. его изучение в локальных участках с размерами в десятки мкм требует неординарной диагностической техники. Установить однозначную зависимость электрических параметров p - n -переходов ($U_{\text{проб}}$), формируемых диффузией As в ампулах, с наличием и величиной $\text{SiO}_{2\text{ост.}}$ не удаётся из-за многофакторности задачи. Во-первых, точность контроля толщины $\text{SiO}_{2\text{ост.}}$ эллипсометром ЛЭФ-2 с объективом ОХ-14, которым мы располагали, была не лучше $\pm 8 \text{ \AA}$. Во-вторых, в связи с влиянием условий окружающей среды и временными факторами, достоверность начальной толщины остаточного оксида кремния ($d\text{SiO}_{2\text{ост.}}$), конечно, не велика. И, в-третьих, постановка “чистых” экспериментов вуалируется в данном случае другими сильными факторами, с которыми связаны $U_{\text{проб}}$ диффузионных p - n -переходов и толщина $\text{SiO}_{2\text{ост.}}$: температура декапирующего травителя, геометрия и

площадь участка травления (окно в защитном окисле), условия герметизации эвакуируемых ампул (радиационный нагрев), динамические параметры диффузионного отжига, в частности, скорость последиффузионного охлаждения ампул, разброс удельного сопротивления кремния по площади легируемых пластин и др. Тем не менее, удаётся установить достаточно значимую зависимость $U_{\text{проб}}$ диффузионных p - n -переходов от толщины $\text{SiO}_{2\text{ост.}}$, рисунок 2.18:

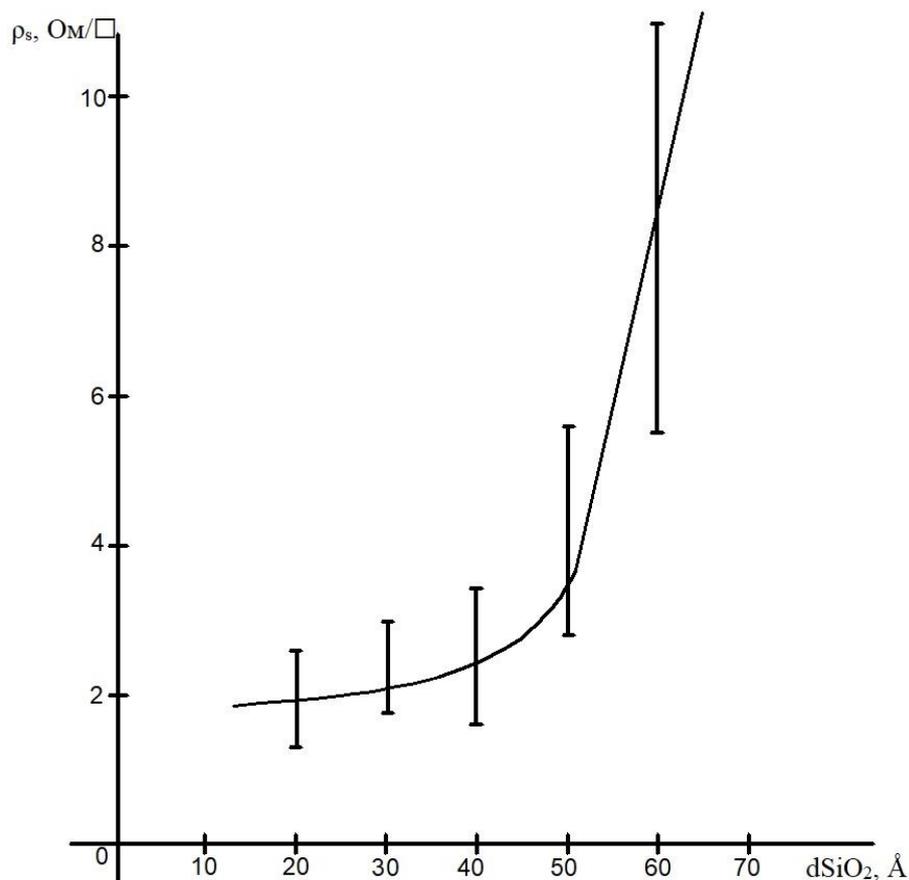


Рисунок 2.18 – Зависимость поверхностного сопротивления диффузионного слоя (ρ_s) при диффузии As в кремний КДБ0,001 от толщины “остаточного” оксида кремния ($d\text{SiO}_{2\text{ост.}}$)

Видно, что оксид кремния толщиной свыше $\sim 50 \text{ \AA}$ может представлять для диффузии As уже практически непреодолимый барьер.

Таким образом, для получения удовлетворительных результатов по формированию низковольтных диффузионных p - n -структур условия проведения технологических операций, предваряющих процесс ампульной диффузии As, так

же, как и собственно процесса диффузии As: химико-механическая подготовка и химическая обработка легируемых кремниевых пластин, количество кристаллического As в ампуле, скорости нагрева-охлаждения загруженных легируемыми кремниевыми пластинами кварцевых ампул, требования к квалификации оператора-кварцедува должны быть предельно регламентированы и воспроизводимы.

Результаты исследования барьерных свойств остаточного оксида кремния при формировании низковольтных *p-n*-переходов диффузией мышьяка приведены в работе [72].

2.6 Исследование диффузионных профилей распределения мышьяка в кремнии

Образцы для исследования профилей распределения As в сильно легированном кремнии в условиях высококонцентрационной ампульной диффузии изготавливали на основе кремния марки КДБ0,001(111) при температуре диффузии 1150°C. Измерение профилей распределения As проводили методами дифференциальной проводимости и активационным. Последним – в институте Электроники АН РУз, г.Ташкент. В измерениях методом дифференциальной проводимости измерение сопротивления удаляемых слоёв кремния с точностью не хуже 1 % проводили с помощью прецизионного четырёхзондового манипулятора собственной разработки, превосходящего по точности образцовый манипулятор разработки АО «Гиредмет», г.Москва [73, 74].

Удельное сопротивление *i*-того слоя рассчитывали по формуле:

$$\rho_{vi} = \Delta x \cdot \left(\frac{1}{\rho_{si+1}} + \frac{1}{\rho_{si}} \right), \quad (2.9)$$

где Δx – толщина *i*-того слоя. Переход от сопротивления слоя к концентрации осуществляли по кривой Ирвина для кремния *n*-типа проводимости [60].

По методике активационного анализа образцы совместно с эталонами (кристаллический As) облучали потоком тепловых нейтронов с интенсивностью $1,3 \cdot 10^{13}$ н/см² в течение (30-40) ч. После облучения и выдержки образцов в течение (2-3) суток на γ -спектрометре измеряли активность изотопов As⁷⁶ в образцах, с

которых последовательно удаляли раствором $\text{HNO}_3:\text{HF}$ слои кремния со скоростью $\sim 0,11$ мкм/мин. Толщину снятого слоя оценивали весовым способом. Концентрацию атомов As в слоях определяли из соотношения:

$$N_{As} = \frac{J \cdot P_{эт} \cdot 6.02 \cdot 10^{23} \cdot d_{si}}{J_{эт} \cdot \Delta P \cdot A}, \quad (2.10)$$

где J - активность снятого слоя (имп/мин); $P_{эт}$ - вес эталона (г); ΔP - вес снятого слоя (г); d_{si} - плотность Si ($\text{г}/\text{см}^3$); A - атомный вес As. Общая погрешность активационного исследования была не хуже 30 %.

Результаты измерений представлены на рисунках 2.19, 2.20. На рисунке 2.20 показан полученный, также активационным методом, профиль распределения атомов фосфора, диффундированного в кремний марки КДБ0,001 в режиме 1150°C в течение 30 мин. из жидкого источника - хлорида фосфора (PCl_3).

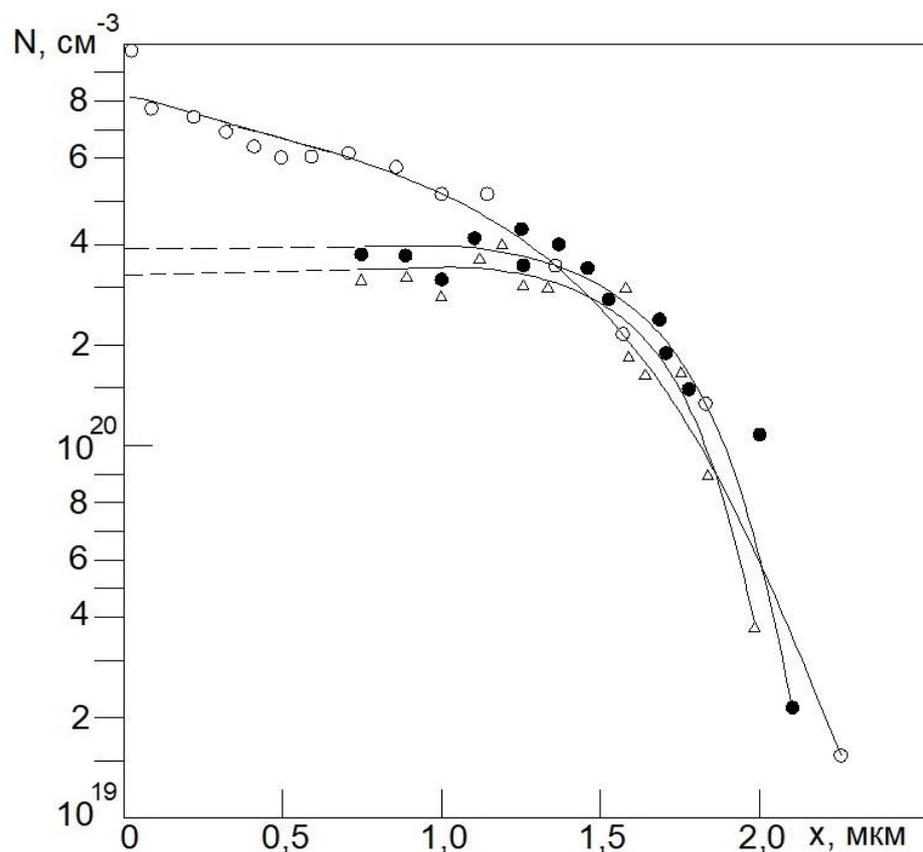


Рисунок 2.19 – Профили распределения мышьяка в сильно легированном кремнии: ooo – диффузия из лигатуры (нейтронный активационный анализ); $\bullet\bullet\bullet$, $\Delta\Delta\Delta$ – соответственно диффузия из источников 400 мГ, 200 мГ As + 5 г кремния КДБ 0.001 (метод дифференциальной проводимости)

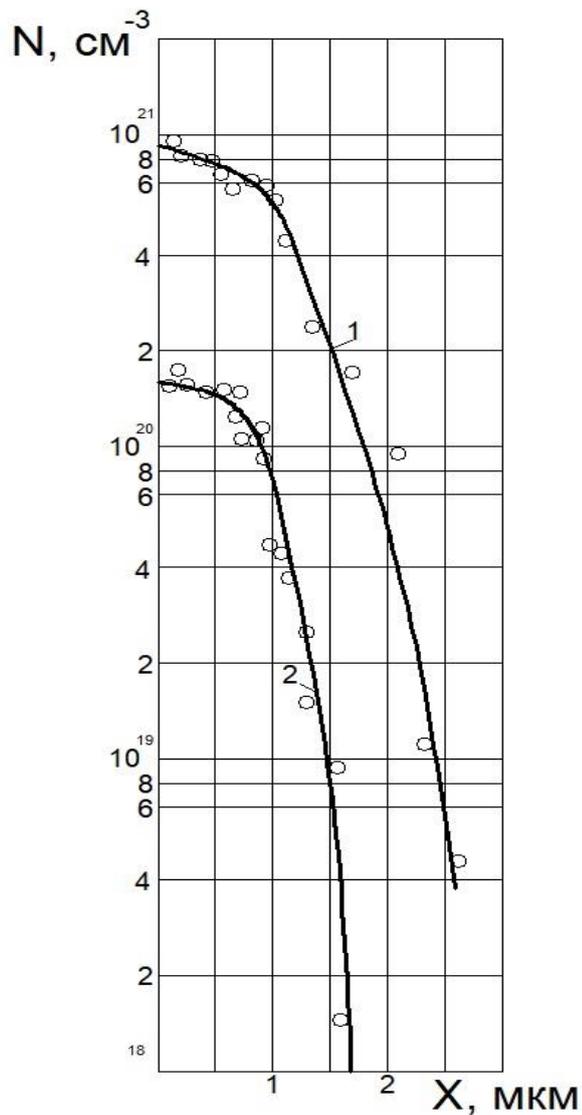


Рисунок 2.20 – Профили распределения мышьяка и фосфора в кремнии КДБ0,001, полученные по нейтронно-активационной методике: 1 – мышьяк; 2 – фосфор

Полученные активационные профили распределения As и P служат наглядным подтверждением одного из преимуществ выбора донорной примеси As для формирования НВ p - n -структур: соотношение поверхностных концентраций As и P составило в данном случае $\sim 1 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ к $1,6 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$.

Диффузионные профили As, измеренные методами проводимости и активационным, как и следовало ожидать, существенно отличаются друг от друга. Первые определяют распределение ионизованных (электрически активных) атомов As, вторые – общее количество диффундировавшего As, т.е. сумму активной и пассивной компонент. Механизм этого явления достаточно хорошо изучен. По

представлениям Фэира и Вебера [75] в процессе диффузии As при температурах ниже 1200°C часть As образует неактивные комплексы, так что полная концентрация As в твёрдом растворе может достигать значения $1,8 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$, в то время как концентрация активной компоненты – только ~30% от полной концентрации.

Фэир и Вебер [75] предложили модель комплексообразования, по которой ионы As взаимодействуют с вакансиями в Si, образуя неактивные комплексы (кластеры) – $V_{\text{Si}}\text{As}_2$. Эксперименты по исследованию неактивных комплексов (кластеров) затруднены из-за малого их размера – не более 25 Å. Формирование кластеров – результат стремления любой системы к состоянию с минимальной свободной энергией.

Имеется несколько моделей кластерообразования, привлекаемых для объяснения высококонцентрационной диффузии As. Так в работе [76] рассмотрена модель кластера, состоящего из четырёх атомов As, образующих четырёхугольник, центром которого является междуузлие либо атом Si. На основании этой модели сделано следующее интересное заключение. Энергия активации образования кластеров в *p*-Si меньше, чем в *n*-Si, что определяет большую предельную растворимость как кластеров, так и находящихся с ними в равновесии ионизованных атомов As в *p*-Si сравнительно с *n*-Si. Это может рассматриваться как ещё один аргумент в пользу применения *p*-Si (КДБ) для получения НВ *p-n*-структур.

Обнаруженный на диффузионных профилях эффект накопления атомов As вблизи поверхности подложки (рисунки 2.19, 2.20) свидетельствует об ограничении скорости высококонцентрационной диффузии As в бескислородной среде скоростью его переноса в решётке кремния – явлении, присущем донорным примесям с высоким коэффициентом сегрегации при наличии на кремнии слоя оксида кремния [61]. А наличие такового имеется всегда, даже при тщательной химической обработке ($\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ в соотношении 1:5), которой подвергаются кремниевые образцы непосредственно перед их загрузкой в ампулу. Тем не менее,

по данным эллипсометрических измерений толщина $\text{SiO}_{2\text{ост}}$ в этом случае может находиться в пределах от 8 до 14 Å.

Распределение ионизированного As в кремнии хорошо аппроксимирует математическая модель Ху, Шмидта [76], учитывающая эффекты полевой и вакансионный, имеющие место при высококонцентрационной диффузии. Следуя работам [77-79], модель диффузии в Si примесей *n*-типа можно записать следующим образом:

$$dN/dt = d/dx(D \cdot dN/dx), \quad (2.11)$$

где $D = D_i[\alpha N + (\alpha^2 N^2 + 1)^{1/2}] \cdot [1 + \alpha N(\alpha^2 N^2 + 1)^{-1/2}]$;

$\alpha = N_s/2n_i$; $n_i = 6,77 \cdot 10^{21} \exp(-1,55/2kT)$; D_i – собственный коэффициент диффузии, N – концентрация примеси, нормализованная по отношению к поверхностной концентрации N_s .

Для уровня высоких концентраций ($N_s \gg n_i$) соотношение (2.7) можно упростить:

$$D = D_i \cdot 4\alpha N. \quad (2.12)$$

В этом случае основное уравнение (2.12) принимает вид:

$$dN/dt = D_s \cdot d/dx(N \cdot dN/dx), \quad (2.13)$$

где D_s – коэффициент диффузии, соответствующий концентрации N_s .

Т.к. аналитическое выражение для уравнения (2.14) получить невозможно, Накаима [77] и Фэйр [78] вывели следующее приближённое соотношение:

$$N = 1 - 0,87Y - 0,45Y^2, \quad (2.14)$$

где $Y = x/4 \cdot \sqrt{\alpha D_i \cdot t}$.

С помощью математической модели (2.10), для экспериментальных значений N_s , D_i и соответствующего значения n_i можно получить расчётный профиль As для конкретных условий диффузии.

Наилучшее соответствие наших экспериментальных и расчётных распределений получено для экспериментального значения $N_{s,As} = 4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ и $D_i = 6 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ ($D_s = 4,8 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ [79]). Однако коэффициенты диффузии As при 1150°C в КДБ0,001 по данным [77, 80] приводят, как показал расчет, к несколько расходящимся с нашим экспериментом результатам, рисунок 2.21:

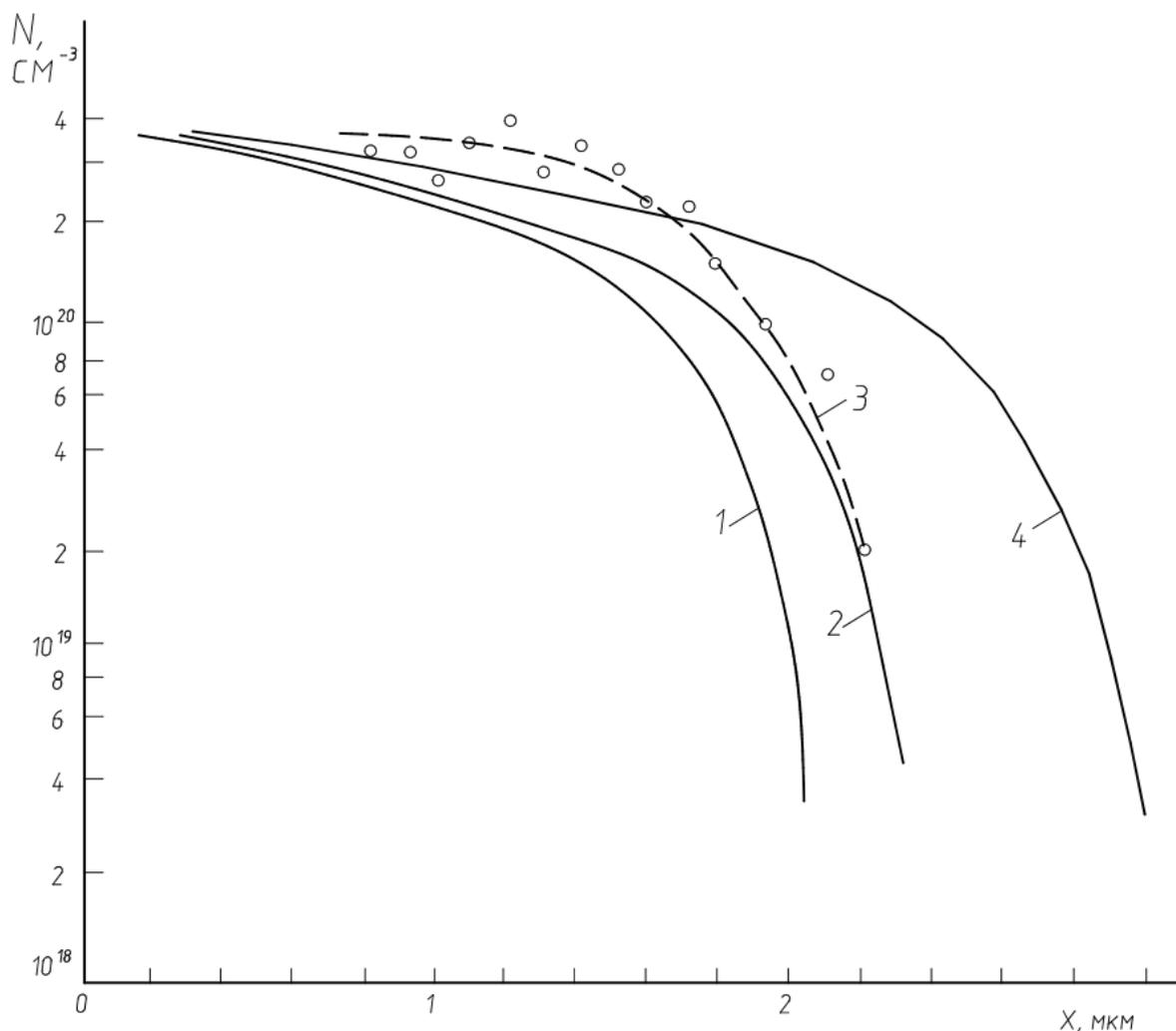


Рисунок 2.21 – Профили распределения мышьяка в кремнии КДБ0,001: 1, 2, 4 – теоретические профили (коэффициенты диффузии взяты из [58, 68]; 3 – расчётный профиль; $\circ\circ\circ$ – экспериментальные данные (метод дифференциальной проводимости)

Различие значений N_s в наших экспериментах [48] и Накаимы [77] можно объяснить существенно разными по величине давлениями пара As в ампуле: максимальное давление в работе [77] не превышало $5,3 \cdot 10^4$ Па, в нашем случае – $2 \cdot 10^5$ Па, т.е. в пять раз выше. Проявляется всё тот же эффект концентрационной зависимости коэффициента диффузии As / скорости диффузии. Соответственно обращает внимание также и то, что крутизна экспериментального распределения As в области залегания p-n-перехода на уровне концентрации базовой примеси (бора) $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ заметно превышает крутизну расчётных профилей концентрации по [77, 79, 80].

Для полной характеристики экспериментальных распределений As математическую модель диффузии As следует дополнить соотношениями, связывающими основные измеряемые параметры диффузии – поверхностное сопротивление (ρ_s) и глубину залегания (x_j). На глубине x_j результирующая концентрация носителей $N_{xj} = 0$. Уравнению (3.15) в этом случае соответствует значение $x_j = 1,616 \cdot (D_s \cdot t)^{1/2}$ или:

$$X_j = 1.616 (2N_s \cdot D_i / n_i)^{1/2}. \quad (2.15)$$

Поверхностное сопротивление легированного слоя определяется классическим выражением:

$$\rho_s = [q\mu \int_0^{x_j} N(x) dx]^{-1}, \quad (2.16)$$

где μ – подвижность носителей. Для $N_s \geq 6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ $\mu \approx 75 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$.

С помощью приближённого выражения (2.15) и учитывая условие $N_s \gg n_i$, интеграл в (2.16) можно представить в виде

$$\int_0^{x_j} N(x) dx = 0,55 N_s \cdot x_j. \quad (2.17)$$

Таким образом, получаем:

$$N_s = 1,56 \cdot 10^{17} / \rho_s \cdot x_j. \quad (2.18)$$

Экспериментальные данные (см. рисунок 2.20), полученные при исследовании методом нейтронно-активационного анализа диффузионных распределений As в сильно легированном кремнии ($T = 1150^\circ\text{C}$, 60 мин. , $P_{As} = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$), позволили установить значения поверхностной концентрации $N_s = 8 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, собственного и эффективного коэффициентов диффузии As $D_i = 6 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$ и $D_s = 4,8 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \text{ с}^{-1}$, что даёт возможность использовать математическую модель Ху, Шмидта (2.10) [76] в качестве феноменологической модели высококонцентрационной диффузии As в сильно легированный кремний. Подтверждением этому могут служить данные, приведённые на рисунке 2.21.

На рисунках 2.22, 2.23 представлены результаты расчёта концентрационных профилей распределения мышьяка в программе TCad при диффузии в эвакуированной ампуле, свидетельствующие о превышении полной концентрации As над его активной составляющей, а также возможности достижения диффузией

As в сильнолегированный кремний достаточной глубины залегания p-n-перехода, таблица 2.4.

Исходные пластины кремния:

КДБ0,01(111) ($N_{\bar{o}} = 8,1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), КДБ0,005(111) ($N_{\bar{o}} = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$)

Осаждение (загонка) мышьяка в режиме $T = 1150^{\circ}\text{C}$, $t = 120$ мин.

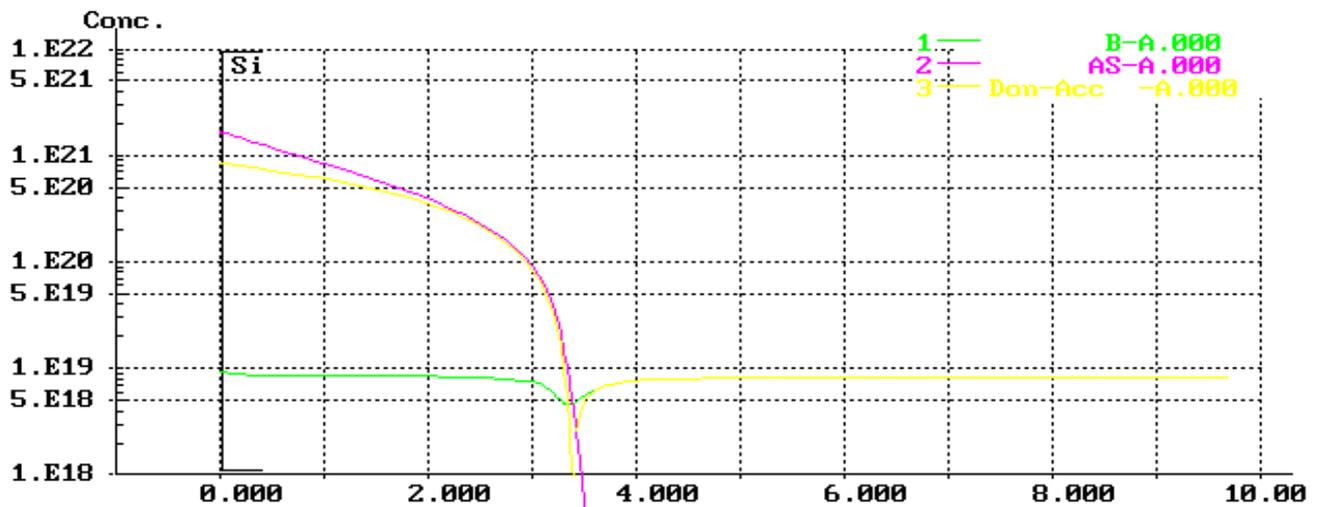


Рисунок 2.22 – Концентрационные профили мышьяка (красный), бора (зелёный) и электрически активных примесей – As, B (жёлтый). $N_{\bar{o}} = 8,1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

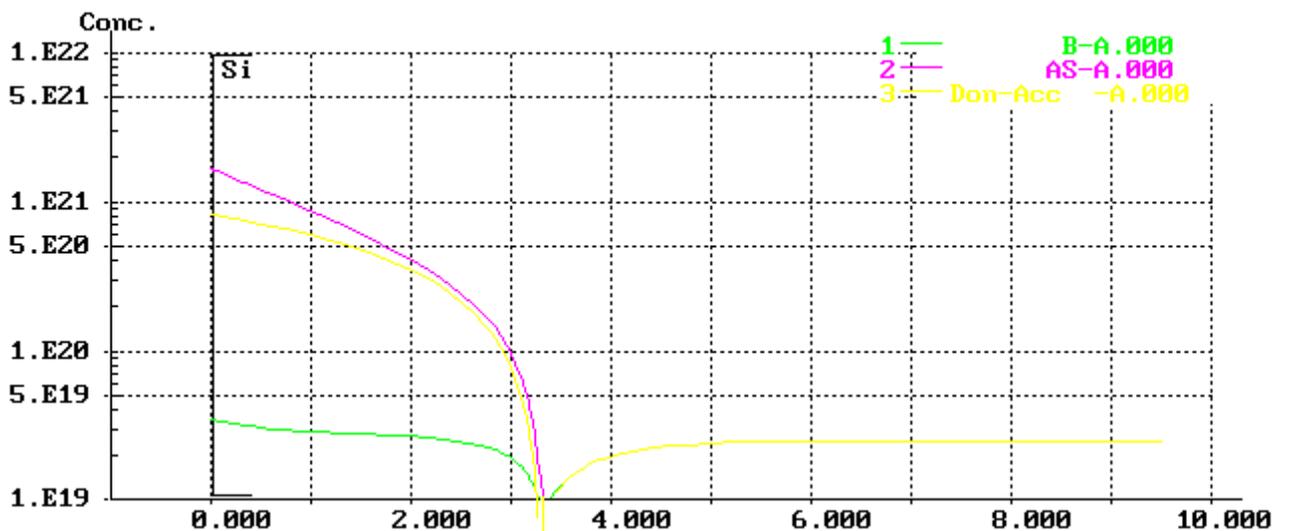


Рисунок 2.23 – Концентрационные профили мышьяка (красный), бора (зелёный) и электрически активных примесей – As, B (жёлтый), $N_{\bar{o}} = 2,1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

Таблица 2.2 – Численные результаты моделирования концентрационного профиля диффузии мышьяка в сильнолегированный *p*-кремний

N_0 бора, см^{-3}	N_s бора, см^{-3}	x_j , мкм	ρ_s , Ом/□	N_s As, см^{-3} , общая	N_s As, см^{-3} , Эл. активная
$8,1 \cdot 10^{18}$	$9,32 \cdot 10^{18}$	3,39	1,67	$1,67 \cdot 10^{21}$	$8,6 \cdot 10^{20}$
$2,1 \cdot 10^{19}$	$2,47 \cdot 10^{19}$	3,31	1,76	$1,67 \cdot 10^{21}$	$8,6 \cdot 10^{20}$

Некоторое расхождение результатов оценки поверхностной концентрации As для двух представленных на рисунках 2.21 и 2.23 распределений примеси объясняется различием концентраций базовой примеси в кремниевой подложке – соответственно $N_0 = \sim 10^{20} \text{см}^{-3}$ и $2,1 \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$, различием режимов диффузии при 1150°C – соответственно 60 и 120 мин, и различием методик измерения / расчёта диффузионных профилей.

Некоторые результаты исследования диффузионных профилей распределения As в сильнолегированном кремнии, сформированных высококонцентрационной диффузией из неограниченного источника в эвакуированном реакторе, приведены в работе [81].

2.7 Исследование электрофизических характеристик диффузионных НВ *p-n*-структур

Техника процесса ампульной диффузии As заимствована у предприятия «ЭЛМА», г.Зеленоград, применявшегося некоторое время при формировании “скрытого слоя” в производстве эпитаксиальных структур для биполярных ИМС, причём, исключительно с низким уровнем поверхностной концентрации (концентрация As в диффузионном слое $N_s \approx 10^{14} \text{см}^{-3}$, поверхностное сопротивление $\rho_s \approx 10 \text{ Ом/□}$) [44].

Для формирования НВ *p-n*-структур разработан специальный комплект фотошаблонов, позволявший на участках кремниевых пластин величиной $(2 \times 2) \text{ мм}^2$ получать одновременно *p-n*-переходы различной площади (S_{p-n}) – от $3,6 \cdot 10^{-3}$ до $7 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$ (диаметры “окон” в защитном слое оксида кремния под диффузию

соответственно от 630 до 30 мкм). Разработан также комплект ФШ, включавший шаблон для формирования диффузией фосфора кольцевого охранного *p-n*-перехода, исключающего краевые эффекты пробоя, связанные с кривизной планарных *p-n*-переходов в месте их выхода на поверхность кремния.

Температурный режим процесса диффузии As в ампуле рассчитан при условии формирования *p-n*-переходов НВ стабилитронов на глубине (x_j) не менее 2 мкм. Для НВ ограничителей напряжения расчёт был на получение планарных *p-n*-структур с x_j не менее (10-12) мкм.

Для эвакуированной кварцевой ампулы критическая температура с точки зрения её прочности – ~1200°C. В то же время, увеличение температуры свыше 1100°C слабо влияет на предельную растворимость мышьяка. В результате выбрана температура 1150°C. Исследования проведены при длительностях процессов диффузии от 1 до 96 часов, учитывая относительно других традиционных легирующих примесей – В, Р, Sb, Al, низкий коэффициент диффузии As (см. таблицу 2.1) и с целью достижения достаточной глубины залегания *p-n*-переходов. Использовался составной источник диффузии As в виде навески As (400 мг) и порошка кремния КДБ0,001 (5 г). Часть экспериментов проведена с навесками As 200 и 300 мг.

В качестве омических контактов к диффузионной области и базе *p-n*-переходов применяли, в основном, Al, толщиной ~ 0,7 мкм, вожённый при температуре 400°C, или систему омической металлизации Ti-Ni-Au (0,3-0,5-0,5) мкм [82]. Систему Ti-Ni-Au использовали для изготовления образцов, предназначенных для испытаний на надёжность. В этом случае к контактам приваривали проволочные золотые выводы Ø 50 мкм, кристалл защищали эмалью ЭП-91 и герметизировали в корпус типа КТ-2-7.

В связи с угрозой проблемы получения малопроникающего омического контакта исследована, в частности, возможность создания малопроникающих контактов методом радиационно стимулированной адгезии (РСА) [83, 84]. С этой целью кремниевые образцы с алюминиевыми контактами, напылёнными в соответствии с четырёхэлектродным методом измерения омического

сопротивления [85], подвергались воздействию электронов с энергией 50 кэВ. Обнаружено, что облучение электронами с такой энергией в течение 7 ч. увеличивает адгезию контактов к кремнию со 120 до 180 кг/см² (измерение “на отрыв”) и снижает удельное сопротивление контакта на ~30 % - с $1,4 \cdot 10^{-4}$ Ом·см² до $(0,5 - 0,8) \cdot 10^{-4}$ Ом·см², рисунок 2.24:

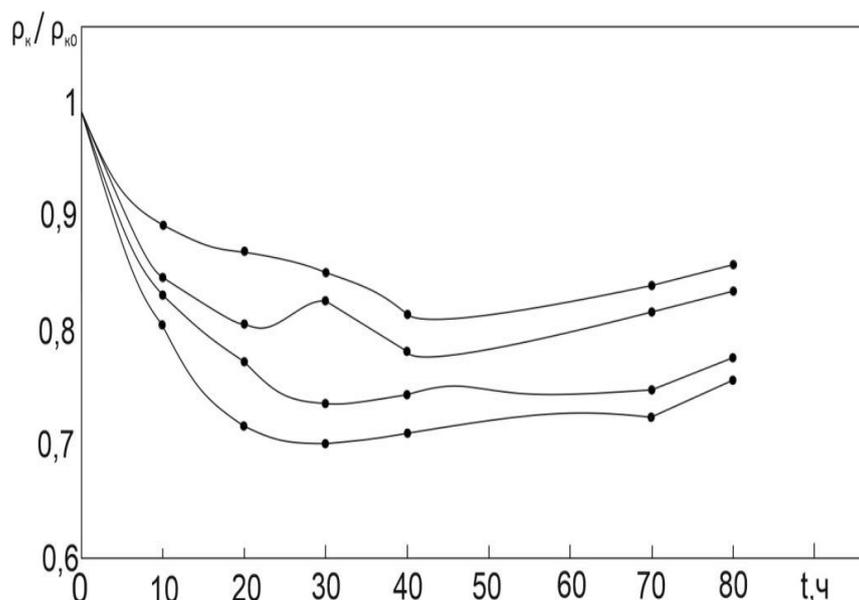


Рисунок 2.24 – Изменение контактного сопротивления системы Al-Si при воздействии электронами

Аналогичные результаты получены при исследовании воздействия рентгеновского излучения на контактные структуры Al-Si. Однако применения в настоящей работе этот способ создания малопроникающих омических контактов не нашёл по причине недостаточной его технологичности. Проблема решена радикальным образом – формированием НВ *p-n*-переходов описанным выше способом диффузии As в эвакуированной ампуле с неограниченным источником в течение достаточно длительного времени.

Электрические параметры экспериментальных *p-n*-структур измеряли в соответствии с действующими в электронной промышленности стандартами. Погрешности измерений не превышали: для $U_{проб} \rightarrow \pm 0,5 \%$; $r_d \rightarrow \pm 10 \%$; $I_{обр} \rightarrow \pm 5 \%$.

2.7.1 Зависимость напряжения пробоя НВ диффузионных $p-n$ -переходов от условий диффузии

На рисунках 2.25, 2.26 представлены результаты измерения параметров напряжение пробоя ($U_{проб}$) и глубина залегания $p-n$ -перехода (x_j) в зависимости от удельного сопротивления кремния (ρ_v) и времени диффузии мышьяка при температуре 1150°C , свидетельствующие о достижении необходимых для конструирования НВ стабилитронов и ограничителей напряжения с напряжениями пробоя до 15 В результатов по глубине залегания $p-n$ -переходов.

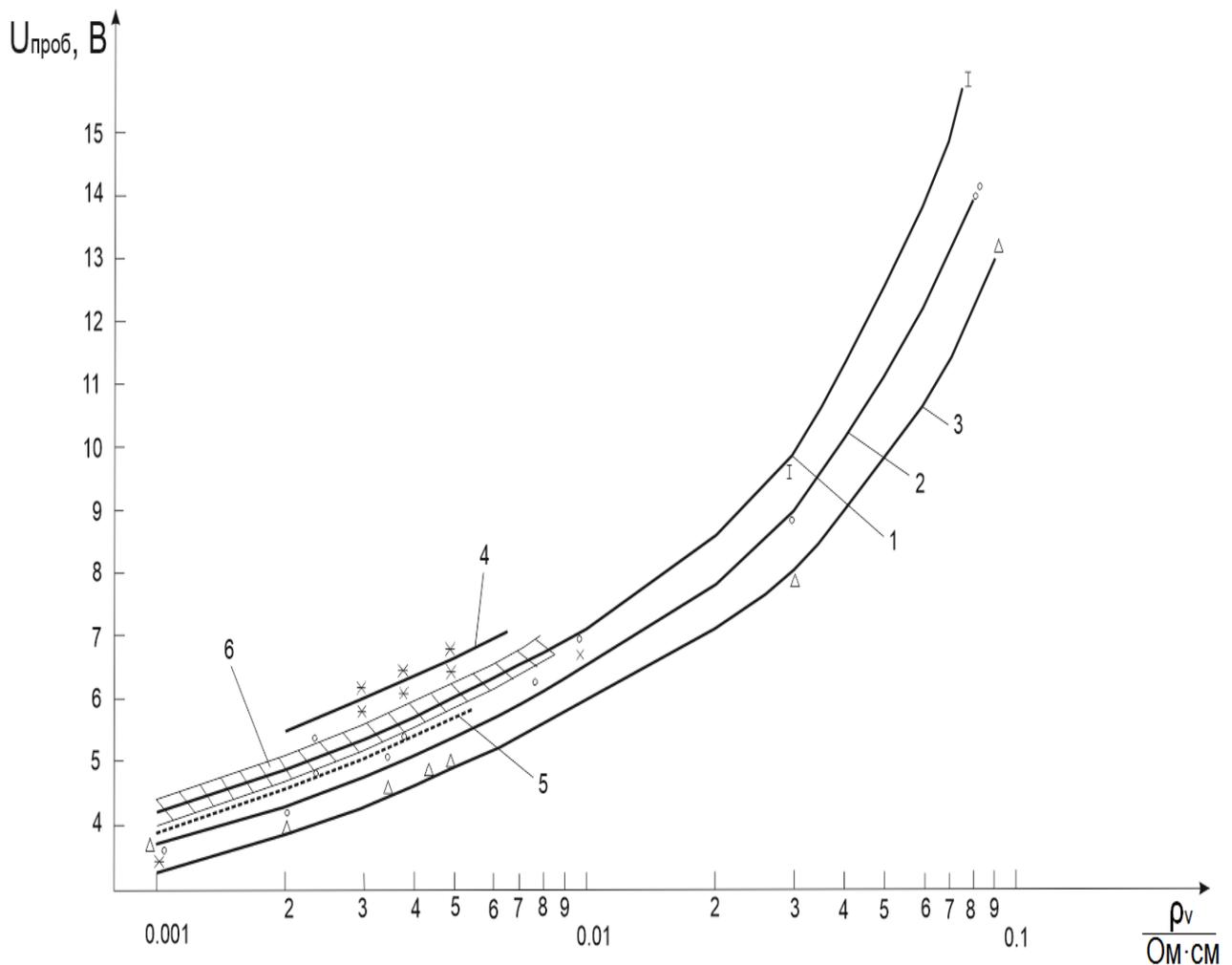


Рисунок 2.25 – Зависимость напряжения пробоя НВ $p-n$ -структур от удельного сопротивления кремния и времени диффузии мышьяка при 1150°C : 1,2,3,4 – 48 ч, 24 ч, 8 ч, 96 ч (охлаждение ампул вместе с диффузионной печью); 5 – 48 ч. (охлаждение ампул вне печи); 6 – область технологического разброса параметра

$U_{проб}$

2.7.2 Зависимость глубины залегания НВ диффузионных p-n-переходов от условий диффузии

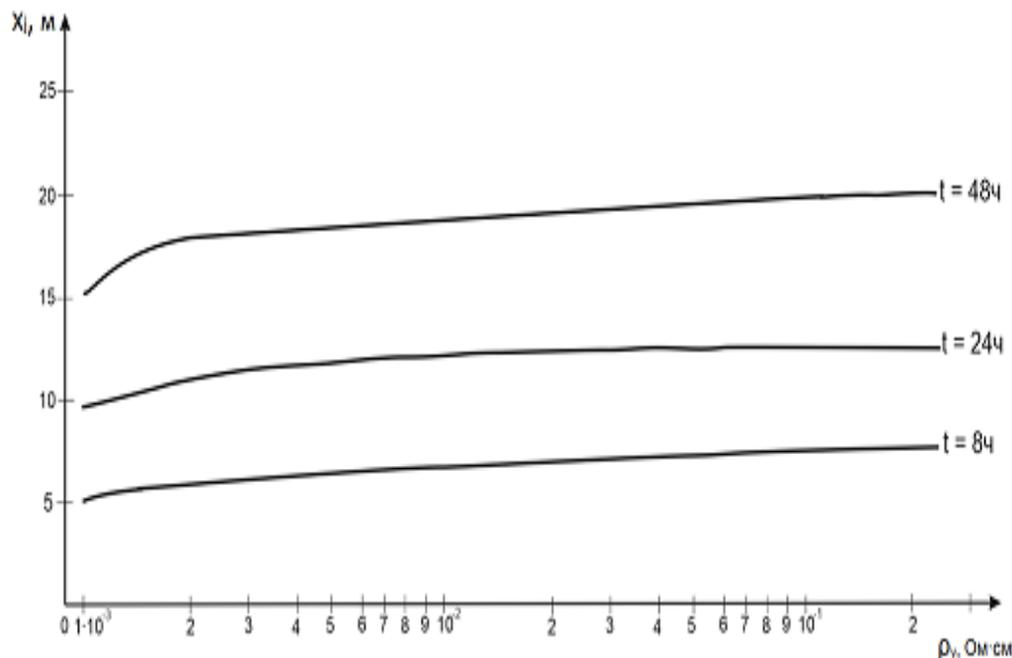


Рисунок 2.26 – Зависимость глубины залегания НВ p-n-переходов от удельного сопротивления кремния и времени диффузии мышьяка при 1150°C

2.7.3 Влияние низкотемпературных отжигов на параметры низковольтных диффузионных p-n-переходов

При исследовании процесса диффузии As в сильнолегированный Si обнаружено, что на величину напряжения пробоя p-n-переходов с туннельным или смешанным механизмами пробоя существенно влияет скорость охлаждения ампулы с легируемыми пластинами после диффузионного отжига. Так охлаждение ампулы струей воды по сравнению с естественным охлаждением приводило к снижению значений $U_{\text{проб}}$ p-n-переходов на $\sim(0,3\div 0,5)$ В в области $U_{\text{проб}} \sim (2\div 6)$ В, рисунок 2.27:

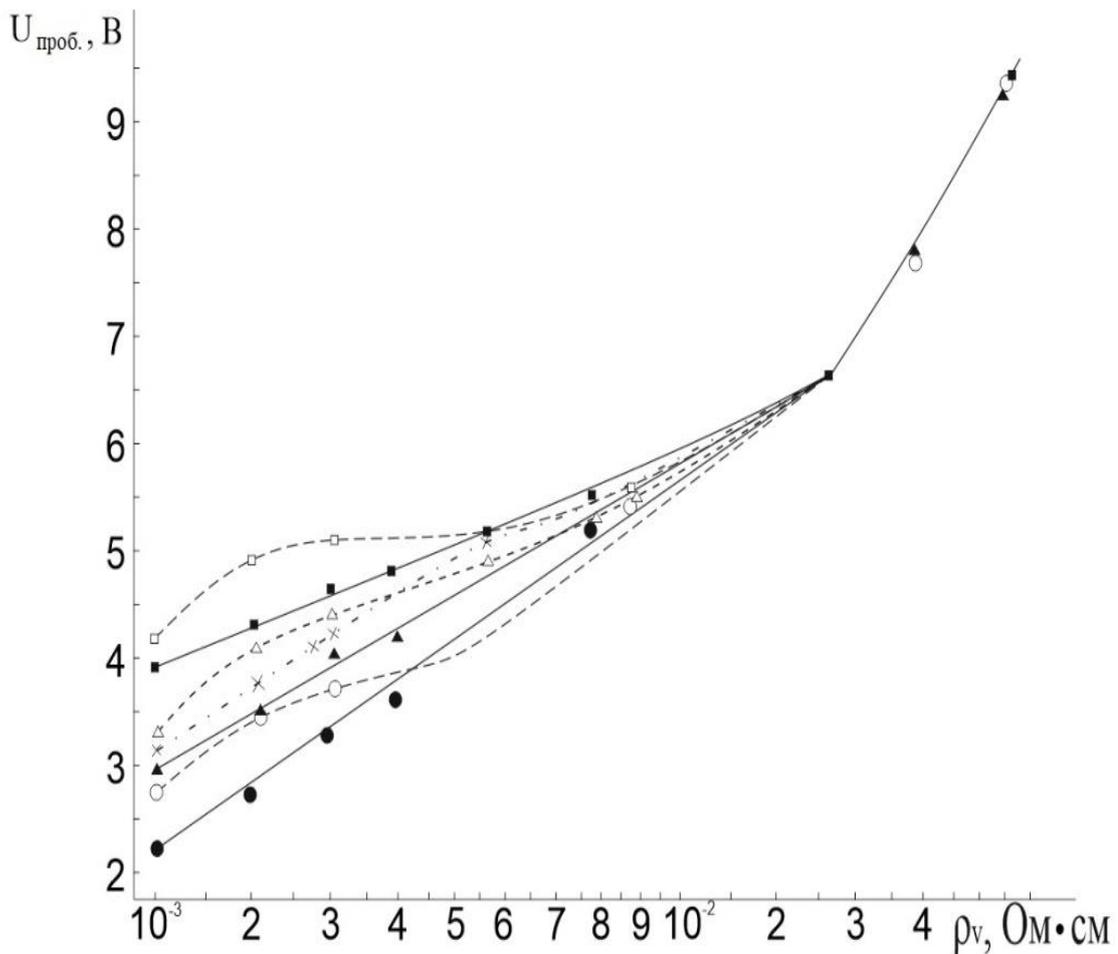


Рисунок 2.27 – Зависимость напряжения пробоя НВ диффузионных $p-n$ -переходов при токе 3 мА с различной площадью от удельного сопротивления подложки и условий отжига: —●—, - -○- - $S_{p-n} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$; —▲—, - -△- - $S_{p-n} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$; —■—, - -□- - $S_{p-n} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$; — 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.

Для исследования эффекта НТ отжига кремниевые пластины КДБ 0,001, 0,002, 0,003 с $p-n$ -переходами, изготовленными в режиме резкого последиффузионного охлаждения, дополнительно отжигали в аргоне при “недиффузионной” температуре 700°C ($D_{As} \sim 10^{-16} \text{ см}^2\text{с}^{-1}$) в течение 30 мин. последовательно несколько раз. В результате наблюдалось увеличение значений $U_{проб}$ $p-n$ -переходов с насыщением практически после двух часов термообработки. Начальные и конечные значения $U_{проб}$ отличались на $\sim (0,35 \div 0,4)$ В. То-есть

изменения $U_{проб}$, наблюдающиеся при охлаждении и недиффузионном отжиге НВ р-п-переходов, связаны, по-видимому, одним и тем же обратимым механизмом.

Обнаружено также, что отжиг р-п-переходов со смешанным механизмом пробоя при температуре 950°C в течение 1 часа вызывал уменьшение значений $U_{проб}$ на ~ 0,8 В, таблица 2.3.

Таблица 2.3 – Изменение напряжения пробоя при $I_{проб} = 3$ мА НВ р-п-переходов в результате отжига при температуре 950°C в течение 1 ч.

$U_{проб}$, В, начальное	3,16	3,66	3,28	4,88
$U_{проб}$, В, после отжига	2,4	2,9	2,5	4,0
$\Delta U_{проб}$, В (минус)	0,76	0,76	0,78	0,88

Причём, если отжиг проводился при 700°C, последующий отжиг при 950°C нивелировал эффект отжига при 700°C и приводил к конечным значениям $U_{проб}$, идентичным тем, что наблюдались в случае отжига р-п-структур только при 950°C, таблица 2.4.

Таблица 2.4 – Изменение напряжения пробоя НВ диффузионных р-п-переходов в результате отжигов при температурах 700°C, 950°C

$U_{проб}$, В, начальное	3,04	3,26	3,57	3,88	4,18	4,56	4,86
$U_{проб}$, В, после отжига 700°C, 30 мин	3,39	3,60	3,80	4,26	4,60	4,90	5,27
Итог	Увеличение $U_{проб}$ относительно начального значения						
$U_{проб}$, В, после отжига 950°C, 1 ч. ($\Delta U_{проб} \rightarrow$ минус)	2,15	2,45	2,78	3,06	3,26	3,55	3,70
Итог	Уменьшение $U_{проб}$ относительно начального значения						

Подобный эффект описан в работе [86] для p - n -переходов с глубоким лавинным пробоем, подвергшихся отжигам при температурах $(950 \div 1100)^\circ\text{C}$. Указанный эффект авторы [86] объясняли перераспределением базовой и легирующих примесей непосредственно у границы раздела Si-SiO_2 в области выхода p - n -перехода на поверхность кремния. Аналогичным образом, а также распадом кластеров As, можно объяснить поведение при отжиге планарных p - n -переходов со смешанным механизмом пробоя.

Подобные эффекты наблюдались и были интерпретированы рядом исследователей как образование в сильнолегированном диффузионном слое комплексов / кластеров легирующей примеси – мышьяка [87, 88]. В частности, показательны в этом плане экспериментальные данные [85]: отжиг диффузионных структур при температурах от 500°C до $\sim 800^\circ\text{C}$ повышает, отжиг при температуре 850°C существенно снижает поверхностное сопротивление, соответственно – снижение, повышение концентрации активного мышьяка в диффузионном слое.

В нашей интерпретации этих явлений с позиций напряжения пробоя p - n -структур ($U_{\text{проб}}$), можно сделать однозначный вывод: отжики в диапазоне “недиффузионных” температур, т.е. менее $\sim 800^\circ\text{C}$, должны повышать $U_{\text{проб}}$ p - n -структур, в диапазоне “диффузионных” температур, т.е. $\sim (800 \div 950)^\circ\text{C}$ – снижать, что как бы противоречит классическим представлениям об изменении электрических параметров p - n -структур при их формировании методами термодиффузии.

То, что часть As в сильно легированном слое находится в неактивной форме в виде нейтральных соединений атомов As между собой показано измерениями эффекта Холла [87]. Объяснение наблюдаемым эффектам даётся с позиций образования в диффузионном слое, легированном As, нейтральных соединений мышьяка (преципитатов, кластеров) в междуузельном пространстве кристаллической решётки кремния при достижении концентрации As в кремнии предела растворимости. Т.е. в результате отжигов диффузионных p - n -структур с высокой поверхностной концентрацией As при относительно низких (до $\sim 800^\circ\text{C}$) и высоких (более $\sim 800^\circ\text{C}$) температурах достигаются такие уровни энергии

активации, которые приводят как к кластеризации As, так и к обратному процессу – “рекластеризации” мышьяка. В первом случае количество ионизированных атомов As убывает, во втором – возрастает.

Концепцию образования и распада кластеров As можно привлечь для интерпретации экспериментальных результатов, представленных на рисунке 2.27 и в таблицах 2.3, 2.4. Проявление этого эффекта характерно в основном для p - n -переходов с туннельным и смешанным механизмами пробоя.

В случае p - n -переходов с преобладающим лавинным механизмом пробоя ($U_{проб} \gg 7$ В) зависимость $U_{проб}$ от изменения концентрации носителей в диффузионном слое выражена очень слабо. Так как по представлению [3, 4]:

$$U_{проб} = const \cdot N_I^{-y}, \quad (2.19)$$

где $N_I = \frac{N_a \cdot N_d}{N_a + N_d}$ – эффективная концентрация, соответствующая уровням легирования диффузионной области (N_d) и базы (N_a) p - n -структуры, а $y = 0,64 \div 0,74$ для ударной ионизации и $y = 1$ для туннельного пробоя, имеем:

$$\frac{\partial U_{проб}}{\partial N_d} = -y \frac{\partial N_I}{\partial N_d}. \quad (2.20)$$

Если $U_{проб} > 7$ В, соответствующее значение N_a составляет не более 10^{19} см^{-3} ($p_v = 0,01$ Ом·см). Для принятых постоянных условий диффузии $N_d \approx 10^{20} \text{ см}^{-3}$, поэтому $\partial N_I / \partial N_d \approx 0$.

В случае p - n -переходов с отчётливым туннельным пробоем ($U_{проб} < 4$ В, $y = 1$) в p -Si с $p_v = 0,001$ Ом·см ($N_a = 1,3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$) при условии $N_d = 4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ из (2.20) можно вывести:

$$\Delta N_I = \left(0,98 - \frac{4}{3,1 + \delta} \right) \cdot 10^{20} \text{ (см}^{-3}\text{)}, \quad (2.21)$$

где $\delta = N_{d1} / N_{d2}$; N_{d1} , N_{d2} – начальные и конечные значения концентрации электрически активного As в диффузионном слое. Если $\delta > 1$, изменение приведенной концентрации (ΔN_I) в области p - n -перехода будет величиной существенной. Причём, как показывает расчёт, в абсолютном значении величины $U_{проб}$ – снижение величины $U_{проб}$ существенно меньше, чем повышение $U_{проб}$ НВ p - n -перехода вследствие отжига в диапазоне “недиффузионных” температур, т.е. менее $\sim 800^\circ\text{C}$.

Таким образом, можно говорить об эффекте температурной трансформации легирующей примеси в диффузионном слое, который можно использовать для низкотемпературной коррекции параметров НВ p - n -структур. Причём, как в пластинах, так и в приборах, если это допускают материалы, из которых изготовлен корпус. Эффект НТ коррекции, наблюдаемый при температурах свыше 400°C , устойчив при температурах эксплуатации полупроводниковых приборов (не более 200°C), т.е. никак не может отразиться на их надёжности. Как будет показано ниже, эффект температурной трансформации легирующей примеси в диффузионном слое нашёл практическое применение при разработке низковольтных и, особенно, термокомпенсированных стабилитронов.

В то же время, результаты НТ отжига низковольтных диффузионных p - n -переходов объясняют причины увеличения разброса значений $U_{проб}$ от процесса к процессу при недостаточной стабильности процессов охлаждения загруженных ампул после проведения высокотемпературного (1150°C) процесса диффузии мышьяка.

Некоторые результаты исследования влияния низкотемпературных отжигов на электрические параметры НВ диффузионных p - n -переходов, полученных высококонцентрационной диффузией As приведены в работе [89].

2.7.4 Исследование дифференциальных сопротивлений низковольтных диффузионных p - n -структур

Важнейший параметр стабилитронов, соответствующий физике их пробоя и характеризующий качество присущих им ВАХ, – дифференциальное сопротивление. Полученные на образцах диффузионных p - n -переходов кривые зависимостей $r_{\partial}(U_{проб})_{проб}$ (рисунок 2.29 целесообразно сопоставить с аналогичными кривыми, снятыми и рассчитанными для НВ сплавных стабилитронов (см. рисунок 1.6 [7])).

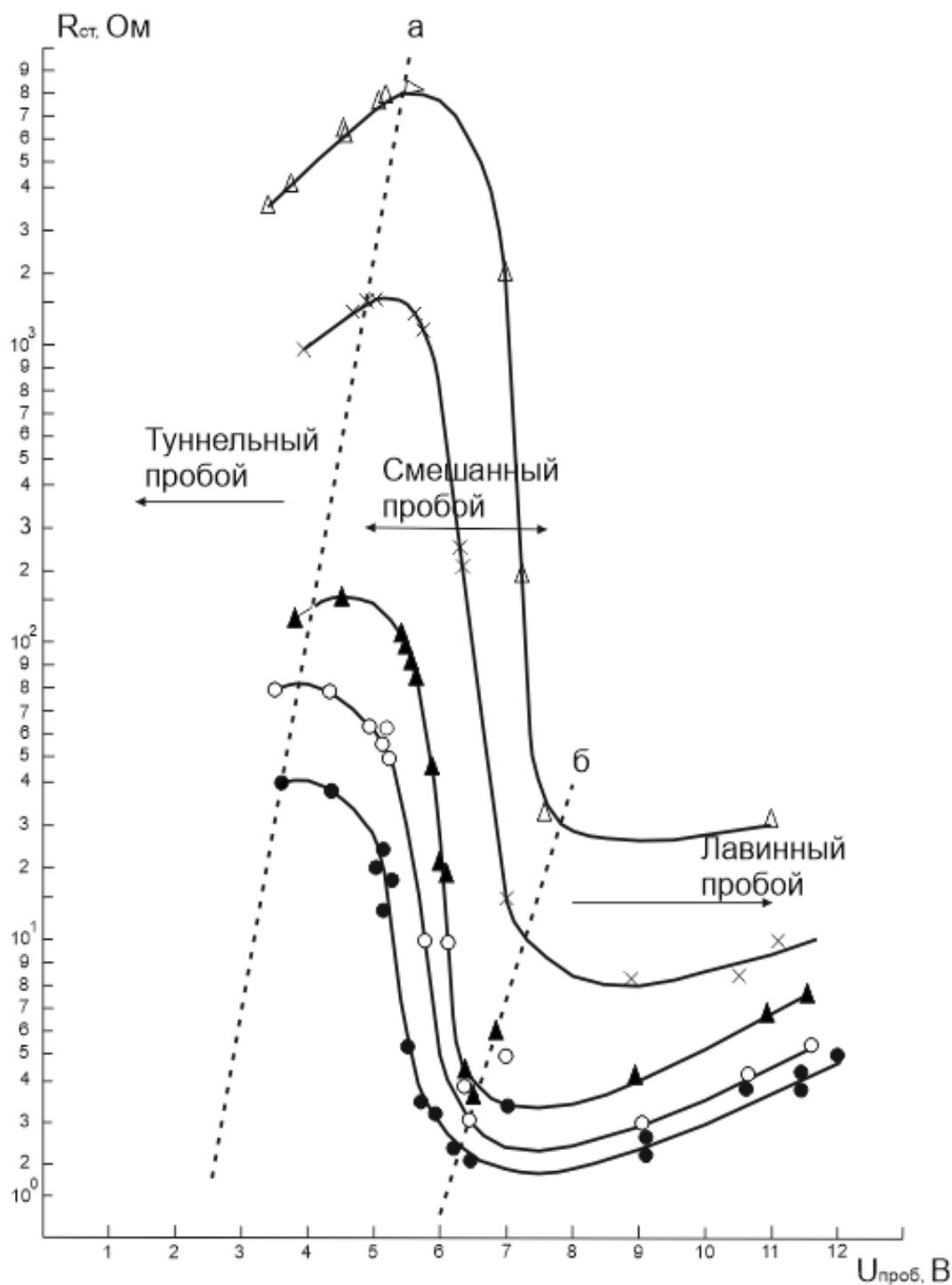


Рисунок 2.28 – Зависимость дифференциальных сопротивлений НВ диффузионных р-п-переходов от напряжения пробоя при различных токах пробоя: ●●●, ○○○, ▲▲▲, ххх, △△△ - 10 мА, 5 мА, 3 мА, 250 мкА, 50 мкА; а, б – границы областей смешанного пробоя

Оба семейства кривых (рисунки 1.6 и 2.29) отличаются характерной N-образной формой с отчётливо выраженными экстремумами, определяющими переход от туннельного к смешанному и от смешанного к лавинному механизмам

пробоя. Рост величины r_d при возрастании $U_{проб}$ в областях туннельного и лавинного пробоев и экспоненциальное снижение в переходной области согласуются с соответствующими теоретическими соотношениями (см. 1.9, 1.28, 1.36).

В то же время, имеется некоторое расхождение “направлений” максимумов сопоставляемых семейств кривых $r_d(U_{проб})_{I_{обр}}$ для области туннельного пробоя, что нельзя объяснить только разными способами получения экспериментальных данных и, соответственно, различием в построении графиков этих семейств. В случае сплавных $p-n$ -переходов, для которых получение НВ $p-n$ -структур с широким управляемым спектром $U_{проб}$ затруднительно, измерения r_d проводят на ограниченном количестве образцов с разными $U_{проб}$ при разных значениях $I_{обр}$. Для диффузионных $p-n$ -структур за счёт возможности использования кремния с разным удельным сопротивлением, разных режимов диффузии и благодаря нелинейной зависимости величины $U_{проб}$ от площади (S_{p-n}) $p-n$ -переходов с туннельным пробоем, о чём ниже будет сказано более подробно, предоставляется возможность получить достаточное количество образцов с плавным распределением значений $U_{проб}$ при фиксированном обратном токе во всём исследуемом диапазоне напряжений пробоя. В этом случае достигается отображение на графике зависимости $r_d(U_{проб})$ определённых точек обратной ВАХ исследуемых $p-n$ -переходов, характеризующихся совокупностью параметров r_d , $U_{проб}$, $I_{проб}$, физически однозначно связанных между собой.

На рисунке 2.29 представлены в логарифмическом масштабе совместно с расчётными [8] экспериментальные зависимости $r_d(I_{проб})_{U_{проб}}$ для сплавных и диффузионных НВ $p-n$ -переходов с $U_{проб}$ 3 В и 9 В:

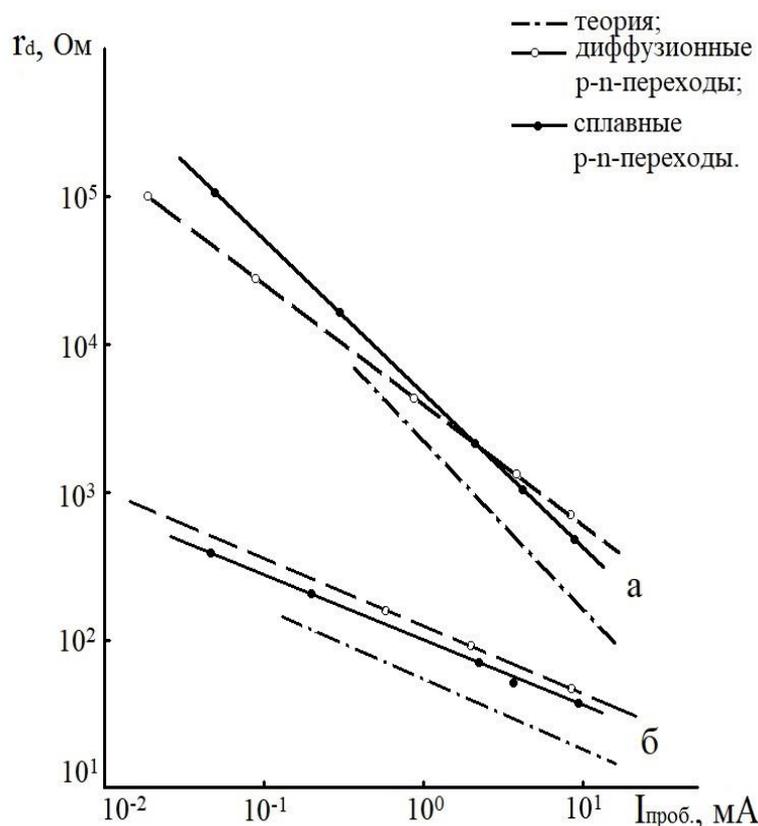


Рисунок 2.29 – Зависимость дифференциальных сопротивлений низковольтных $p-n$ -переходов от тока пробоя для диффузионных и сплавных $p-n$ -переходов с напряжениями пробоя 3 В (а) и 9 В (б) [8]

В области лавинного пробоя ($U_{\text{проб}} = 9 \text{ В}$) – практически полное соответствие семейств кривых $r_d(I_{\text{проб}})_{U_{\text{проб}}=\text{const}}$ для диффузионных и сплавных НВ $p-n$ -структур вследствие несущественной в этом случае зависимости $U_{\text{проб}}$ от обратного тока – резкий ход обратной ветви ВАХ. Некоторое расхождение семейств кривых $r_d(I_{\text{проб}})_{U_{\text{проб}}=\text{const}}$ для диффузионных и сплавных НВ $p-n$ -структур в области туннельного пробоя ($U_{\text{проб}} = 3 \text{ В}$) наблюдается также и с известными результатами теории (кривая $---$). По-видимому, известные теоретические построения этой зависимости [8] в определённой степени опирались на экспериментальные данные для единственно существовавших в то время сплавных $p-n$ -переходов, для которых практически невозможна точная оценка площади $p-n$ -перехода.

Возможно, объяснение этого расхождения заключается также в некотором естественном различии градиентов концентрации диффундировавшего As и

вплавляемого Al, вследствие различия их максимальных поверхностных концентраций в 2.78 раз в соответствии с соотношением их атомных масс: Al \rightarrow 26,98 а.е., As \rightarrow 74,92 а.е., и значительного расхождения величин их коэффициентов диффузии. Так как сплавление Al проводится при температуре $\sim 760^\circ\text{C}$, а диффузия As при 1150°C , коэффициент диффузии Al почти в 2 раза меньше коэффициента диффузии As: $N_{sAl} \gg N_{sAs}$, $D_{Al}(760^\circ\text{C}) < D_{As}(1150^\circ\text{C})$. В результате, для равных значений $U_{\text{проб}}$ сплавные p - n -переходы формируются на значительно более высокоомном кремнии. Можно отметить, что именно таким образом – измерением сопротивления кристаллов образцов зарубежных низковольтных стабилитронов, в то время зарубежные производители низковольтных стабилитронов также пользовались сплавной технологией.

Таким образом, вне зависимости от того, каким способом получены p - n -структуры, сплавным или высококонцентрационной диффузией As, присущие им уровни дифференциальных сопротивлений практически неразличимы для равных значений $U_{\text{проб}}$ и $I_{\text{проб}}$. Очевидно, это равенство соответствует достижению диффузией As равенства градиентов концентрации легирующих примесей в области НВ p - n -перехода диффундирующей примеси (As) и вплавляемого в сильнолегированный кремний Al.

Отметим, что измерения температурного коэффициента напряжения пробоя ($\alpha U_{\text{проб}}$) низковольтных диффузионных p - n -переходов также не дали каких либо новых результатов в сравнении с известными данными для сплавных p - n -переходов.

Также кривые зависимости $r_{\partial}(U_{\text{проб}})I_{\text{проб}}$ (см. рисунок 2.27) позволяют сделать ещё несколько выводов. Видно, что переходам от туннельного к смешанному и от смешанного к лавинному механизмам пробоя соответствуют значения $U_{\text{проб}} \sim 3,5$ и $6,5 \dots 7,5$ В в зависимости от величины обратного тока. Некоторое смещение экстремумов вправо в случае малых токов связано, по-видимому, с уменьшением вероятности включения первой микроплазмы лавинного пробоя P_{01} [86]:

$$P_{01} = \gamma \cdot P, \quad (2.22)$$

где y – вероятность нахождения носителя в области пробоя; P – вероятность того, что данный носитель способен ионизировать.

Величина P_{01} обусловлена, главным образом, первым сомножителем уравнения (2.23). Одним из сильных механизмов появления носителя в области пробоя (локализации первой микроплазмы) является туннельный эффект. Так как туннельный ток распределён по p - n -переходу равномерно, его уменьшение снижает пропорционально плотность тока и, следовательно, вероятность появления ионизирующего носителя в области пробоя. Поэтому зажигание первой микроплазмы происходит при больших значениях $U_{проб} \rightarrow$ максимум r_d смещается вправо.

С другой стороны, в переходной к преобладающему лавинному пробую области наблюдается относительно большой разброс измеряемых значений r_d . По-видимому, это также связано с вероятностным характером механизма появления в области p - n -перехода, т.е. в области с максимальной напряжённостью поля носителя, способного дать начало лавине уже не за счёт механизма туннелирования, а других случайных механизмов.

Факт близкого совпадения экспериментальных зависимостей $r_d(U_{проб})_{обр}$ для диффузионных и сплавных p - n -переходов позволяет сделать заключение, представляющее большой практический интерес. Предварительно отметим, что показатель степени (коэффициент “резкости”) в известной формуле зависимости ёмкости p - n -перехода от обратного смещения для образцов диффузионных p - n -переходов с $U_{проб}$ (2,4÷5,6) В приближается к значению «1/3», характерному для линейных p - n -переходов. Линейность полученных диффузионных p - n -переходов подтверждается также хорошим согласием результатов проведённой выше оценки концентрации базовой примеси, необходимой для получения p - n -переходов с $U_{проб} = 7$ В., и экспериментальных данных по связи параметров $U_{проб}$ и ρ_v .

Отметим также, что вывод о линейности НВ p - n -переходов сделан ранее даже для сверхмелких НВ p - n -переходов, изготовленных методом ионной имплантации [46].

Для исследованных параллельно сплавных $p-n$ -переходов с величинами $U_{\text{проб}}$ от 3,3 до 13 В (серийные сплавные стабилитроны 2С133В, 2С180А – 32С313А) коэффициент “резкости” был существенно выше: 0,4...0,43, т.е. приблизился к значению 0,5, характерному для теоретических “резких” $p-n$ -переходов. Таким образом, нет прямой зависимости ВАХ НВ $p-n$ -переходов и соответствующих им значений r_d для заданных $U_{\text{проб}} = \text{const}$ от характера распределения легирующей примеси в $p-n$ -переходе. Правомерность этого вывода подтверждается данными по r_d для $p-n$ -переходов с равными $U_{\text{проб}}$, но изготовленными на кремнии с разными $\rho_v(N)$ и имеющими отличающиеся по величине площади, рисунок 2.30.

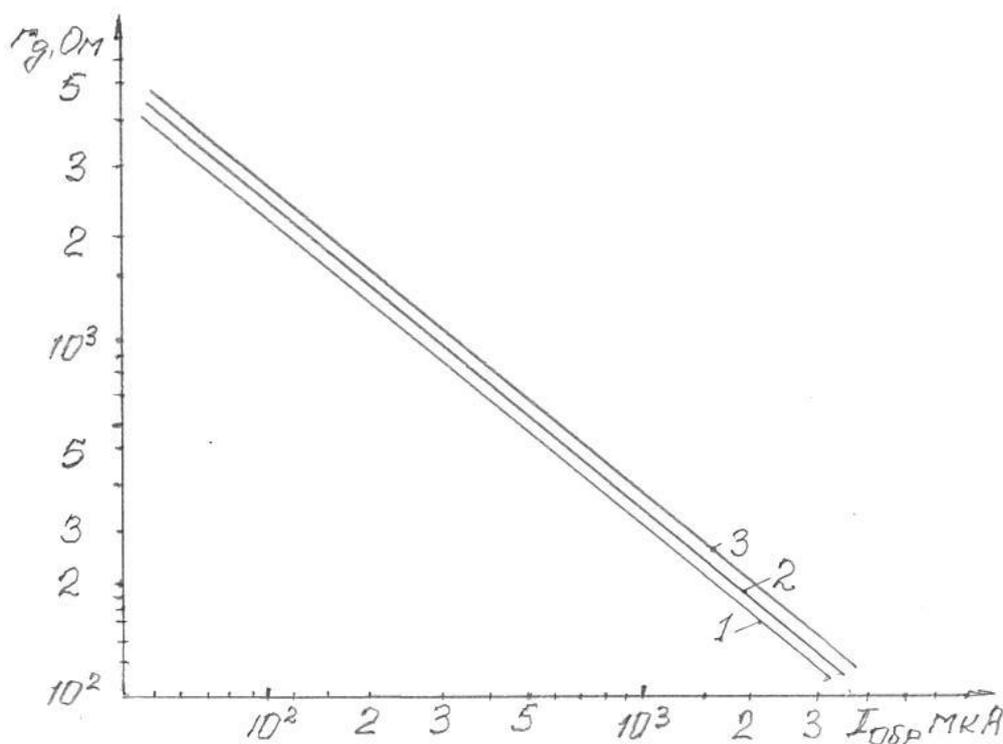


Рисунок 2.30 – Зависимость дифференциального сопротивления (r_d) от обратного тока ($I_{\text{обр}}$) и $U_{\text{проб}} = \text{const}$ для $p-n$ -переходов с равными $U_{\text{проб}} = 4,3$ В при

$I_{\text{обр}} = 3$ мА, но изготовленными на кремнии с разными $\rho_v(N)$ и имеющими отличающиеся по величине площади: 1 – $S_{p-n} = 3 \cdot 10^{-5}$ см², КДБ0,001; 2 – $S_{p-n} = 4 \cdot 10^{-4}$ см², КДБ0,002; 3 – $S_{p-n} = 1,5 \cdot 10^{-3}$ см², КДБ0,003

Значения дифференциальных сопротивлений (r_d) таких p - n -переходов идентичны вплоть до значений $S_{p-n} = 8 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$ и значений обратного тока $I_{обр} = 50$ мкА, рисунок 2.31.

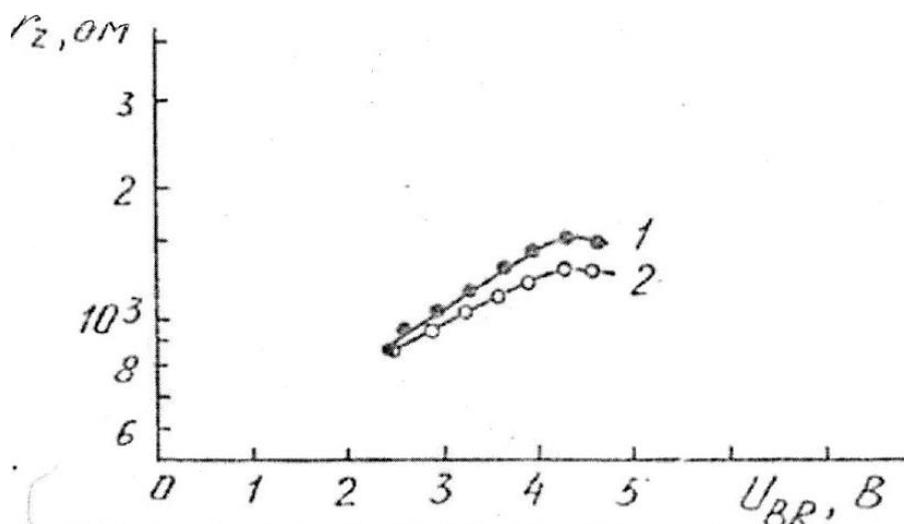


Рисунок 2.31 – Зависимость дифференциального сопротивления (r_d) от напряжения пробоя ($U_{проб}$) при обратном токе $I_{обр} = 50$ мкА: 1 – $S_{p-n} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$; 2 – $S_{p-n} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$

2.7.5 Зависимость напряжения пробоя низковольтных диффузионных p - n -структур от площади p - n -перехода

На рисунке 2.32 представлены экспериментальные зависимости напряжения пробоя ($U_{проб}$) от площади (S_{p-n}) p - n -переходов, изготовленных диффузией мышьяка (навеска As 400 мг и 5 г порошка кремния КДБ 0,001 в p -кремний с удельным сопротивлением 0,001 – 0,1 Ом·см в режиме резкого последиффузионного (вне диффузионной печи) охлаждения ампул водой [92].

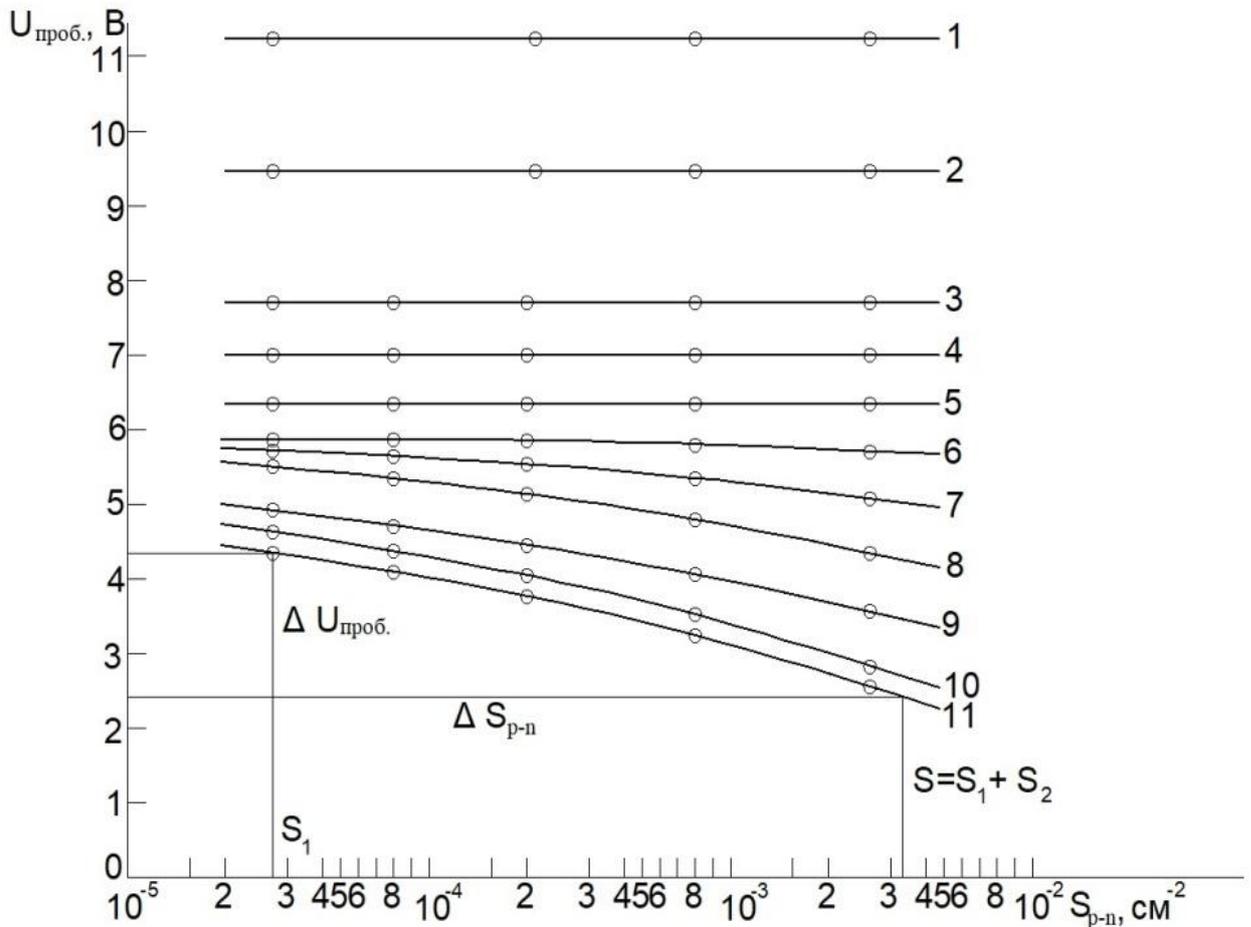


Рисунок 2.32 – Зависимость напряжения пробоя низковольтных $p-n$ -структур от площади $p-n$ -перехода: 1...11 $\rightarrow \rho_v$ соответственно 0,06; 0,04; 0,03; 0,025; 0,02; 0,01; 0,007; 0,0045; 0,003; 0,002; 0,001 Ом·см

Эксперименты проведены с помощью специального комплекта фотошаблонов для проведения операций фотолитографии, обеспечивающего формирование на одном кристалле с размерами $2 \times 2 \text{ мм}^2$ одновременно нескольких $p-n$ -переходов с различной площадью / размерами окон под диффузию от площади с $\text{Ø}50 \text{ мкм}$ ($S_{p-n} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$) до площади $630 \times 630 \text{ мкм}^2$ ($S_{p-n} = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$), что позволяет исследовать параметры диффузионных $p-n$ -структур в зависимости от плотности тока через $p-n$ -переход. Для $p-n$ -переходов, получаемых сплавлением навесок Al в кремний такая возможность практически отсутствует из-за неопределённости площади сплавления Al в кремний, рисунок 2.33.

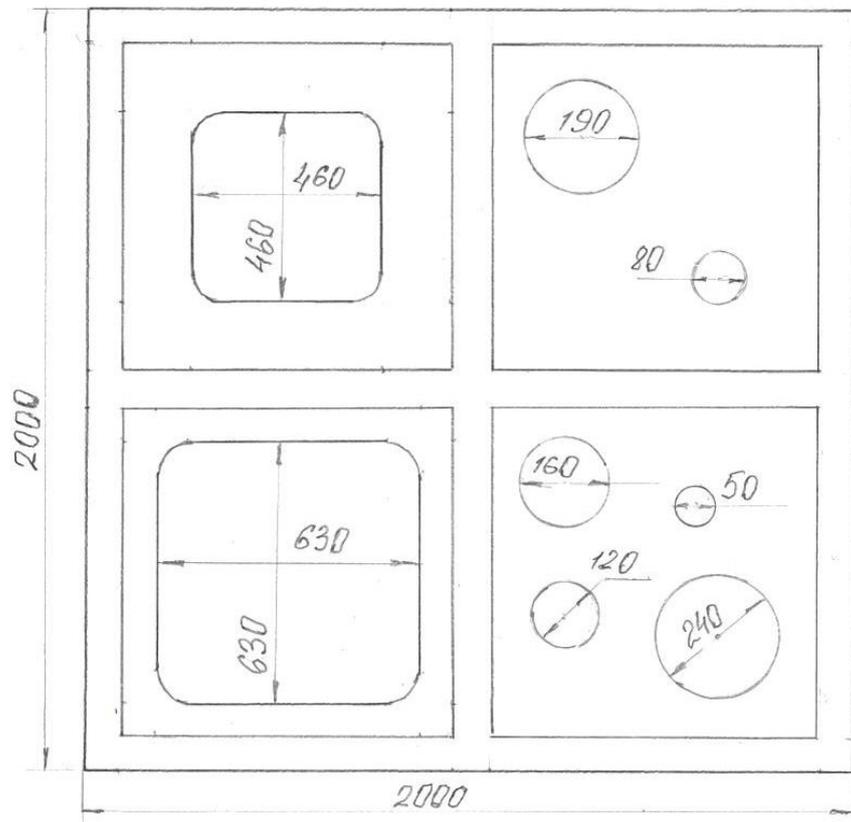


Рисунок 2.33 – Фотошаблон для переменных по площади $p-n$ -переходов

Примечательно, что поведение указанных зависимостей в исследуемой области напряжений пробоя также подчиняется закону изменения механизмов пробоя в зависимости от площади $p-n$ -перехода. Другими словами – от плотности тока через $p-n$ -переход. Для значений $U_{проб} \geq 6$ В напряжение пробоя $p-n$ -переходов остается неизменным в широком диапазоне значений S_{p-n} , что хорошо согласуется с известными представлениями о насыщении эффективной площади лавинного пробоя [91]. Ниже ~ 6 В наблюдается уменьшение значений $U_{проб}$ с ростом S_{p-n} для фиксированных значений p_v . Причём, для p_v ($0,07 \div 0,001$) 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

$$U_{проб} = U_{проб,j} - K \cdot \lg(S_{p-n}/S_{p-n,j}), \quad (2.23)$$

где $U_{проб,j}$ – напряжение пробоя $p-n$ -перехода, характеризующегося некоторой 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 $p-n$ -перехода с туннельным пробоем.

Подобное, нелинейное соотношение между напряжением пробоя и площадью $p-n$ -перехода с туннельным пробоем можно вывести из фундаментального выражения для плотности туннельного тока (см. (1.8) [55]).

Действительно, логарифмируя выражение (1.8), получаем для постоянного $I_{обр}$ очень важное существенно нелинейное соотношение между напряжением пробоя и площадью $p-n$ -переходов с туннельным пробоем, подобное экспериментальному (2.24):

$$K_1 \cdot \lg S_{p-n} = K_2 \cdot \lg(U_{проб. j} - U_{проб.}) \cdot U_{проб.} - K_3 / (U_{проб. j} - U_{проб.}), \quad (2.24)$$

где $I_{обр} = j_m \cdot S_{p-n}$ – обратный ток через туннельный $p-n$ -переход с площадью S_{p-n} ; K_1 , K_2 , K_3 – физические постоянные $p-n$ -перехода с туннельным механизмом пробоя.

Соответствие экспериментальной зависимости (2.23) и теоретической зависимости напряжения туннельного пробоя ($U_{проб. m}$) от площади $p-n$ -перехода (S_{p-n}) (2.24) иллюстрирует рисунок 2.34.

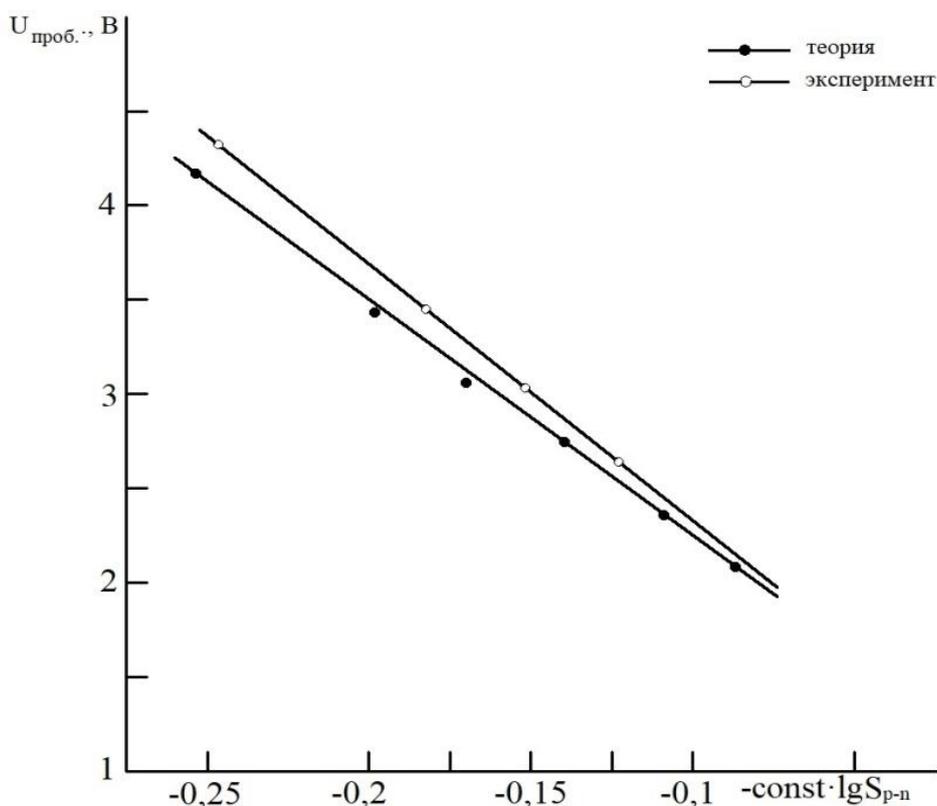


Рисунок 2.34 – Экспериментальная и теоретическая зависимости напряжения туннельного пробоя ($U_{проб. m}$) от площади $p-n$ -перехода (S_{p-n})

Зависимость $U_{проб}(S_{p-n})_{pv}$ (см. рисунок 2.32) представляет значительный практический интерес. Для $p-n$ -переходов с $U_{проб} < 6$ В такого рода литературные данные отсутствуют. Последнее обусловлено тем, что известные исследования низковольтных $p-n$ -переходов базировались на сплавной технологии, не позволяющей достаточно широко и точно варьировать параметр S_{p-n} . Впервые возможность управления напряжением пробоя $p-n$ -переходов с туннельным пробоем за счет параметра S_{p-n} показана в нашей работе [93]. Позже возможность управления механизмом пробоя $p-n$ -переходов с $U_{проб} \approx (4 \div 6)$ В за счет плотности тока, т.е. за счёт S_{p-n} , была отмечена в работах Фэира и Вивела [46]. Однако использование этого очень эффективного конструкционного параметра в указанной работе отражения не нашло.

Эффект нелинейной зависимости $U_{проб}(S_{p-n})$ $p-n$ -переходов с туннельным пробоем использован в разработках нескольких широко востребованных серий низковольтных ($U_{ст} / U_{проб}$ менее 5 В) стабилитронов и ограничителей напряжения.

Эффект нелинейной зависимости $U_{проб}(S_{p-n})$ $p-n$ -переходов с туннельным пробоем может быть использован также, например, для создания нового типа преобразователей напряжения с отрицательным дифференциальным сопротивлением. В области нелинейной зависимости $U_{проб}(S_{p-n})$ изменению площади $p-n$ -перехода (ΔS_{p-n}) соответствует изменение напряжения пробоя ($\Delta U_{проб}$): см. рисунок 2.33. Из этого следует, что увеличение тем или иным способом площади $p-n$ -перехода с туннельным пробоем, приведёт к преобразованию величины $U_{проб}$ $p-n$ -перехода с меньшей площадью на меньшую величину $U_{проб}$ объединённого $p-n$ -перехода с большей площадью, что будет соответствовать интегральной ВАХ с отрицательным сопротивлением. Реализована конструкция такого преобразователя напряжения, управляемого МОП-системой, создающей проводящий канал между двумя $p-n$ -переходами с туннельным пробоем (см. главу 5) [94].

2.8 К понятию “резкости” $p-n$ -перехода

Обращает внимание на себя то, что исследователи и теоретики $p-n$ -переходов, оперируют понятиями “резких” и “плавных” $p-n$ -переходов по

отношению к сплавным и диффузионным p - n -переходам, вне зависимости от величины их напряжения пробоя. При этом они ориентируются на то, что градиент концентрации легирующей примеси для источника в виде впаляемого в кремний металла, в данном случае – Al, априори выше, чем в случае диффузионного легирования из источников с заведомо более низкой поверхностной концентрацией легирующей примеси, чем в металле. Выявляется то, что фронт впаляемого металла – диффузионный: между кремниевой подложкой и впаляемым металлом существует ещё и так называемый рекристаллизованный слой с определённым диффузионным распределением в нём концентрации металла. Если обратиться к характеру поведения / виду обратных ВАХ p - n -переходов в области напряжений пробоя, охватывающей p - n -переходы как с туннельным, так и с лавинным механизмами пробоя (см. рисунок 1.1), понятие “резкий” можно отнести только к p - n -переходам с лавинным пробоем. На рисунке 2.35 представлено семейство ВАХ стабилитронов BZX84, выпускаемых фирмой Diotec Semiconductor, ФРГ [95]:

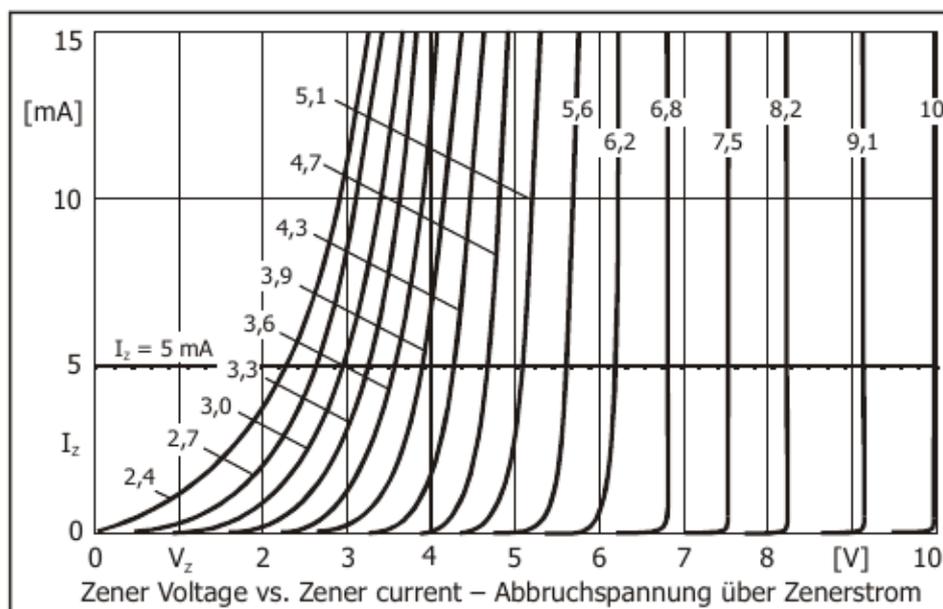


Рисунок 2.35 – Вольтамперные характеристики низковольтных стабилитронов BZX84, выпускаемых фирмой Diotec Semiconductor, ФРГ. DATA Sheet BZX84C2V4 ... BZX84C47 [95]

В данном случае, к действительно “резким”, с точки зрения потребителя, следует отнести стабилитроны со значением напряжения стабилизации свыше 6,8 В, т.е. с преобладанием лавинного механизма пробоя. Такие стабилитроны

характеризуются минимальным динамическим сопротивлением (r_d), а значит и более высоким коэффициентом стабилизации: $K_{cm} = (\Delta U_{ex}/U_{ex}) / (\Delta U_{вых}/U_{вых})$.

Сплавные p - n -переходы являются резкими, но с иных позиций. Благодаря применяемой на практике относительно низкой температуре сплавления Al в кремний (680-800)°C, которой соответствуют пренебрежимо малые коэффициенты диффузии Al \rightarrow не более 10^{-16} см²/с (экстраполяция данных [49]), в области сплавного p - n -перехода Al распределён по экспоненте (см. рисунок 1.3), что и обуславливает высокий градиент его концентрации $\Delta N_{Alp-n} \geq 10^{24}$ см⁻⁴, являющийся мерилем “резкости”.

Сплавным p - n -переходам соотносят модель резко несимметричного p^+ - n -перехода (см. рисунок 1.2 а) и теоретическое описание его проводят для условия $N_a \gg N_d$ [14]. В действительности картина выглядит сложнее. Обычно при формировании сплавных p - n -переходов сплавление алюминия проводят в n -кремний с базовой концентрацией ($3 \cdot 10^{17}$ - 10^{19}) см⁻³. Можно привести пример [15], когда НВ p - n -переходы получали, сплавления Al в кремний марки КЭМ, легированный мышьяком до концентрации $7 \cdot 10^{19}$ см⁻³, что в несколько раз выше предельной растворимости Al в кремнии [21]. Таким образом, удавалось получить очень узкие p - n -переходы с шириной ОПЗ до 100 Å и $U_{проб}$ порядка 0,5 В. В то же время, концентрация акцепторной примеси Al со стороны сплавления (в рекристаллизованном слое) составляла не более $(1,3 \dots 2) \cdot 10^{19}$ см⁻³ в зависимости от температуры сплавления. Т.е. в этом примере выполнялось соотношение $N_a < N_d$.

С другой стороны, при изготовлении НВ p - n -переходов диффузией As его поверхностная концентрация достигает величины $\sim 4 \cdot 10^{20}$ см⁻³, сравнимой с величиной поверхностной концентрации Al ($7 \cdot 10^{20}$ см⁻³). Однако, что следует из наших экспериментальных данных по зависимости основных электрических параметров p - n -структур, полученных диффузией As в ампулах, в сравнении с аналогичными данными для сплавных p - n -переходов с туннельным и смешанным механизмами пробоя (см. рисунок 2.29) отличие их друг от друга совершенно не существенное. Это говорит о том, что модель резкого p - n -перехода также

применима и к диффузионным *p-n*-переходам с туннельным и смешанным механизмами пробоя.

Рассмотрим понятие “резкости” с позиции величины эффективной концентрации легирующих примесей в НВ *p-n*-переходе (таблицы 2.5, 2.6):

Таблица 2.5 – Величины эффективной концентрации легирующей примеси сплавных (алюминий) и диффузионных (мышьяк) *p-n*-переходов с туннельным механизмом пробоя

Сплавной <i>p-n</i> -переход (КЭФ, алюминий)				Диффузионный <i>p-n</i> -переход (КДБ, мышьяк)			
Напряжение пробоя, $U_{\text{проб}}$, В				Напряжение пробоя, $U_{\text{проб}}$, В			
3,3	3,9	4,7		3,3	3,9	4,7	
0,013	0,015	0,017	ρ_v	0,001	0,002	0,0035	ρ_v
$2,7 \cdot 10^{18}$	$2,5 \cdot 10^{18}$	$2,2 \cdot 10^{18}$	$N_d P$	$10,4 \cdot 10^{19}$	$5 \cdot 10^{19}$	$3 \cdot 10^{19}$	$N_a B$
$7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$			$N_a Al$	$4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$			$N_d As$
$2,69 \cdot 10^{18}$	$2,49 \cdot 10^{18}$	$2,19 \cdot 10^{18}$	$N_{\text{эф}}$	$8,3 \cdot 10^{19}$	$4,4 \cdot 10^{19}$	$2,8 \cdot 10^{19}$	$N_{\text{эф}}$

Таблица 2.6 – Величины эффективной концентрации легирующей примеси диффузионных (фосфор, мышьяк) *p-n*-переходов с лавинным пробоем

Диффузионный <i>p-n</i> -переход (КДБ, фосфор)				Диффузионный <i>p-n</i> -переход (КДБ, мышьяк)			
Напряжение пробоя, $U_{\text{проб}}$, В				Напряжение пробоя, $U_{\text{проб}}$, В			
7,5	9,1	11		7,5	9,1	11	
0,018	0,025	0,04	ρ_v	0,023	0,042	0,064	ρ_v
$3 \cdot 10^{18}$	$2 \cdot 10^{18}$	$0,8 \cdot 10^{18}$	$N_d P$	$2,5 \cdot 10^{18}$	$2,2 \cdot 10^{18}$	$0,45 \cdot 10^{18}$	$N_a B$
$1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$			$N_a Al$	$4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$			$N_d As$
$\sim 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$			$N_{\text{эф}}$	$\sim 4 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$			$N_{\text{эф}}$

Сплавные *p-n*-переходы реализуются на кремнии с удельным сопротивлением в разы больше, чем для идентичных по величине напряжения

пробоя диффузионных p - n -переходов. Таким же образом отличаются их эффективные концентрации. В любом случае для НВ p - n -переходов с напряжением пробоя ниже, в данном случае 4,7 В, величина $N_{эф}$ существенно изменяется при изменении величины $U_{проб}$, что очевидным образом отличает p - n -переходы с туннельным и смешанным механизмами пробоя от p - n -переходов с лавинным пробоем.

На основании данных из таблиц 2.5, 2.6 на рисунке 2.36 представлена зависимость эффективной концентрации ($N_{эф}$) диффузионных p - n -переходов с туннельным, смешанным и лавинным механизмами пробоя, полученных диффузией фосфора и мышьяка в сильнолегированный кремний, от напряжения пробоя ($U_{проб}$):

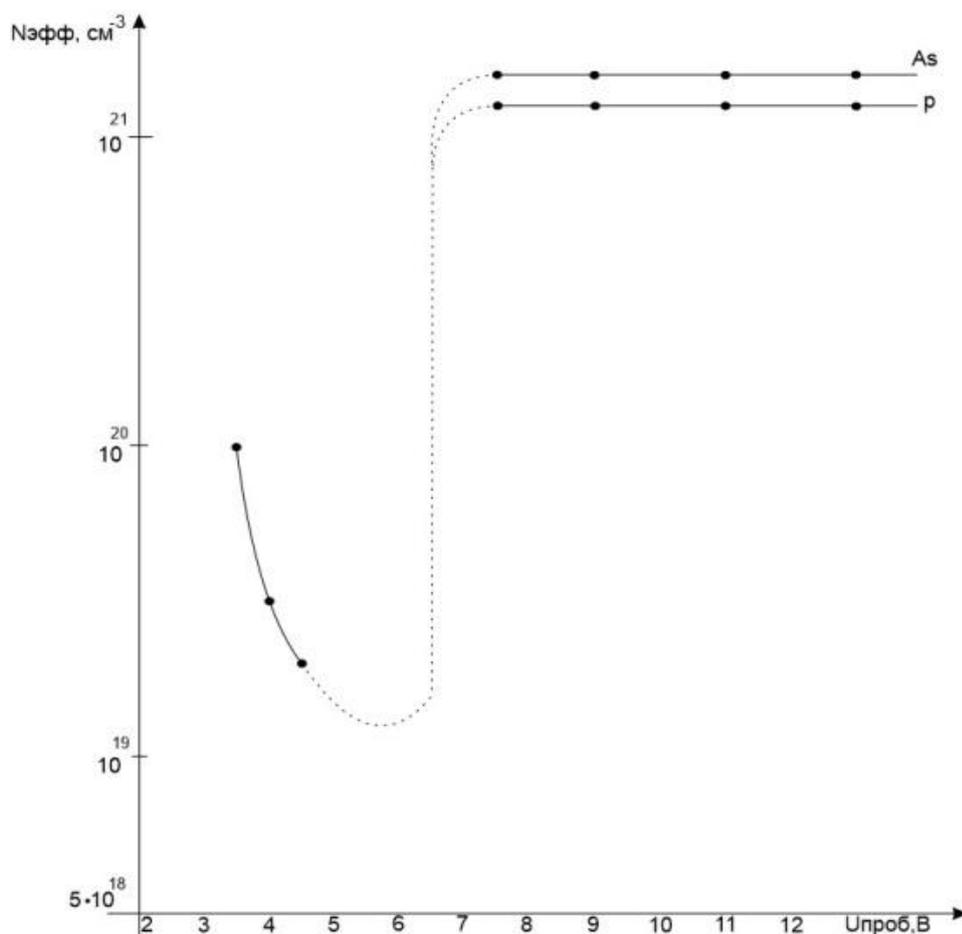


Рисунок 2.36 – Зависимость эффективной концентрации от напряжения пробоя для низковольтных p - n -переходов: As – диффузия мышьяка, P – фосфора

Наблюдается отчётливая картина изменения эффективной концентрации при смещении механизма пробоя от туннельного к лавинному.

Прямым критерием равенства напряжений пробоя сплавных и диффузионных p - n -переходов и соответствия величины их “резкости” должно быть равенство их градиентов концентрации / эффективных концентраций в области p - n -перехода. Но так как оценка, расчёт или экспериментальное определение градиента концентрации легирующей примеси в области p - n -перехода (в одном случае – Al, в другом – As) представляют задачу со многими очень приближёнными параметрами, предлагается величину “резкости” НВ p - n -перехода оценивать по характеру поведения зависимости напряжения пробоя p - n -переходов от удельного сопротивления (концентрации базовой примеси) кремниевой подложки, претерпевающего резкий переход на рубеже $\sim 6,7$ В (см. рисунок 2.29), и зависимости эффективной концентрации ($N_{эф}$) от напряжения пробоя ($U_{проб}$) – рисунок 2.36.

Таким образом, для НВ диффузионных p - n -переходов, также как и для сплавных, на основании экспериментальных данных по зависимости напряжения пробоя от удельного сопротивления подложки $U_{проб}(\rho_v)$ и с позиций поведения величины $N_{эф}$ легирующей примеси в диапазоне напряжений пробоя НВ p - n -переходов, к “резким” следует относить p - n -переходы с $U_{проб}$ до 6,7 В.

В этой связи попробуем оценить эффект от применения, с целью получения более качественных НВ p - n -структур, так называемых сверхрезких p - n -переходов (см. рисунок 1.3) [15]. Если говорить о “сверхрезком” p - n -переходе с экспоненциальным распределением легирующей примеси [15], то не ясно, чем он будет отличаться по физической структуре и, следовательно, по электрическим параметрам от сплавных p - n -переходов. Более того, экспоненциальный характер распределения легирующей примеси в диффузионных “сверхрезких” p - n -структурах должен быть менее выраженным, чем в сплавных p - n -структурах. “Сверхрезкие” p - n -переходы, образованные диффузионными профилями легирующих примесей со встречными градиентами [16], по-видимому, могут быть более “резкими”, чем сплавные p - n -переходы. Это не является, однако,

достаточным условием улучшения электрических параметров (r_d) таких $p-n$ -структур.

2.9 Туннельный пробой низковольтных $p-n$ -переходов с дефектами структуры кремния

Анализируя экспериментальную зависимость $U_{проб}$ от S_{p-n} , можно сделать еще несколько замечаний. Значения $U_{проб}$ $p-n$ -переходов с туннельным пробоем, измеренные на структурах с разной площадью, с высокой точностью, ограниченной только погрешностью измерений, укладываются на соответствующую, абсолютно регулярную кривую $U_{проб}(S_{p-n})$ (см. рисунок 2.32). В то же время, дисперсия $U_{проб}$ по отдельным пластинам для туннельной и лавинной областей пробоя заметно отличается и составляет, соответственно, 0,08 В и 0,24 В для выбранного “рабочего” источника диффузии. Аналогично этому, имеет место увеличение разброса $U_{проб}$ от процесса диффузии As к процессу для более высокоомных легируемых пластин. Другими словами, дисперсия параметра $U_{проб}$ НВ диффузионных $p-n$ -переходов уменьшается с ростом концентрации основной легирующей примеси в кремнии, вопреки известным представлениям о соотношении концентрации легирующей примеси и количества структурных нарушений в кремнии, на основе которого они изготавливаются. Проявление этого интересного физического эффекта требует отдельного анализа.

Прохождение тока через обратно смещенный $p-n$ -переход сопровождается оптическим излучением в видимой и ИК областях спектра. Пользуясь этим, Чиновес и Мак Кей [10] исследовали распределение тока в туннельных и лавинных $p-n$ -переходах. Установлено, что $p-n$ -переходы с лавинными пробоем дают видимое излучение, локализованное в отдельных точках с размерами $(0,1 \div 2)$ мкм, которым из-за большой плотности тока в них Роуз [90, 96] дал название микроплазм. Туннельные $p-n$ -переходы излучают ИК свет, причём распределение его по площади $p-n$ -перехода совершенно равномерно. Дальнейшие многочисленные исследования показали, что локализация лавинного пробоя связана с дефектами кристаллической решетки в области пространственного заряда $p-n$ -перехода, с неоднородностями распределения легирующих примесей,

локальными искривлениями p - n -перехода и др. подобными факторами. Что касается p - n -переходов с туннельным пробоем можно указать только на работы [97, 98], в которых отмечена нечувствительность ВАХ реальных p - n -переходов с туннельным пробоем к структурным дефектам [977] и к естественной деформации решётки высоколегированного кремния [98]. Указанные эффекты разъясняются в работах [99, 100]. В качестве исходной предпосылки принимается гипотеза безусловного превышения напряженности электрического поля в области структурного дефекта (\mathcal{E}_{dam}) средней напряженности поля в идеальном p - n -переходе (\mathcal{E}_{perf}) как с лавинным, так и с туннельным пробоем [99]:

$$\mathcal{E}_{dam}/\mathcal{E}_{perf} = n; n > 1. \quad (2.25)$$

В результате для лавинных p - n -переходов выведено, что появление дефекта в области p - n -перехода приводит к увеличению коэффициента умножения (M) и, соответственно, к росту обратного тока, т.е. образованию микроплазмы. Действительно:

$$\frac{M_{dam}}{M_{perf}} = \frac{1 - C_1 \cdot W \cdot \exp(-\mathcal{E}_l/\mathcal{E}_{m.perf}^2)}{1 - C_2 \cdot W \cdot \exp(-\mathcal{E}_l/\mathcal{E}_{m.dam}^2)}, \quad (2.26)$$

где \mathcal{E}_l – характеристическое поле лавинного пробоя [101]. После разложения экспоненты в степенной ряд получаем:

$$\frac{I_{dam}}{I_{perf}} \sim \frac{M_{dam}}{M_{perf}} > 1 < \frac{\mathcal{E}_{m.dam}^2}{\mathcal{E}_{m.perf}^2} = n^2. \quad (2.27)$$

То-есть $\mathcal{E}_{m.dam} > \mathcal{E}_{m.perf}$, что согласуется с соотношением (2.24). Это значит, что любые нарушения структуры в области пространственного заряда p - n -перехода с лавинным пробоем должны приводить к резкому различию распределения плотностей тока по площади. Интересно отметить, что для более широких p - n -переходов, к которым применима менее сильная зависимость коэффициента умножения от напряжённости электрического поля $M(\mathcal{E})$ [102], $I_{dam}/I_{perf} = n$. То-есть можно ожидать, что влияние дефектов на лавинный пробой переходов с более высокими $U_{проб}$ ($\gg 10$ В) будет, по-видимому, более слабым.

В случае туннельного пробоя:

$$\frac{I_{dam}}{I_{perf}} \sim \frac{\exp(-\mathcal{E}_T/\mathcal{E}_{T.m.dam})}{\exp(-\mathcal{E}_T/\mathcal{E}_{T.m.perf})} \rightarrow 1, \quad (2.28)$$

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

Из (4.10) получаем:

$$-\frac{\mathcal{E}_T}{\mathcal{E}_{T.m.dam}} + \frac{\mathcal{E}_T}{\mathcal{E}_{T.m.perf}} \approx 0, \quad (2.29)$$

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

$$\mathcal{E}_{T.m.dam} = \mathcal{E}_{T.m.perf} \neq 0. \quad (2.30)$$

То-есть, максимальная напряженность электрического поля в p - n -переходе с туннельным пробоем не чувствительна к структурным нарушениям. Полученный результат вполне согласуется с представлениями работы [99] о «насыщении» коэффициента туннелирования. В то же время, отсутствует соответствие между выведенным выше соотношением (2.29) и соотношением (2.24), принятым в работе [99] в качестве исходного. Суть в том, что в работе [99] имеется вторая неточность, компенсирующая первую. А именно, расчёт соотношения токов I_{dam}/I_{perf} в [99] проведён для условия $\mathcal{E}_{m.m.} \gg \mathcal{E}_m$. В действительности, дело обстоит иначе: см. (2.29) [102].

Таким образом, экспериментальные данные о связи напряжения пробоя ($U_{проб}$) и площади p - n -переходов (S_{p-n}), изготовленных диффузией As в кремний с удельным сопротивлением 0,001 - 0,1) Ом·см (см. рисунок 2.32) и проведенные теоретические оценки соотношений токов и напряженностей электрического поля на дефектных и совершенных участках p - n -переходов с лавинным и туннельным механизмами пробоя служат экспериментальным подтверждением основных положений теории туннельного пробоя относительно влияния структурных дефектов на электрические параметры низковольтных p - n -переходов [103].

Выводы к главе 2

1. 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.

2. Установлено, что наиболее значимые факторы негативного характера обусловлены:

- наличием на диффузионном поле барьерного слоя остаточного оксида кремния, толщина которого прямо зависит от предварительной химической обработки кремниевых пластин и времени высокотемпературной заварки шлиф-пробки кварцевой ампулы и не должна превышать (15-20) Å;
- скорости последидиффузионного охлаждения загруженных кварцевых ампул, для стабилизации которой целесообразно охлаждение ампул водой. Охлаждение ампул водой целесообразно также для предотвращения осаждения проводящих частиц As на поверхности легируемых пластин.

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

4. 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 наличия части As в диффузионном слое в электрически неактивной форме в виде нейтральных кластеров вакансионного типа $V_{Si}As_2$ – метастабильных образований, которые могут быть активированы в результате НТ отжигов, что позволяет использовать НТ отжиги для тонкой корректировки электрических параметров НВ *p-n*-структур. Концепция образования и распада кластеров As разъясняется с позиций понятия эффективной концентрации для *p-n*-переходов с туннельным механизмом пробоя.

5. Получен пакет рабочих 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}), обеспечивающий разработки НВ стабилитронов, термокомпенсированных стабилитронов и ограничителей напряжения.

6. 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.

7. 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.

8. 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 возможности получения глубоких $p-n$ -структур для силовых полупроводниковых приборов – НВ ограничителей напряжения.

9. Понятие “резкости” $p-n$ -переходов носит двоякий характер: с точки зрения характера ВАХ к резким следует отнести $p-n$ -переходы с лавинным механизмом пробоя, с точки зрения высокого градиента концентрации легирующей примеси в $p-n$ -переходе – $p-n$ -переходы с туннельным механизмом пробоя.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ПЛАНАРНО-ДИФфуЗИОННЫХ НИЗКОВОЛЬТНЫХ СТАБИЛИТРОНОВ

3.1 Поиск и анализ информации о зарубежных и отечественных технологиях изготовления низковольтных стабилитронов

Стабилитроны широко применяются в качестве ключевых элементов источников опорного напряжения (ИОН), являющихся, в свою очередь, базовыми электронными узлами различного рода электронных устройств, поддерживающими высокостабильное постоянное рабочее напряжение.

Стабилитроны в составе источников опорного напряжения используются в качестве эталонной меры в аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователях. Точности измерения, преобразования и стабильность выходных характеристик всех этих устройств определяются точностью задания и поддержания постоянного напряжения.

Особая роль и значимость низковольтных стабилитронов в электронной технике определяются объективной тенденцией развития электронной техники в направлении создания радиоэлектронных устройств (РЭУ) с низкими уровнями питания, для которых низковольтные стабилитроны (НВС) служат источниками опорного напряжения.

Вследствие этого степень актуальности решения задачи диссертационной работы по разработке НВ стабилитронов на основе современной планарно-диффузионной технологии, замещающей технологию сплавления Al в Si, обеспечивающей принципиально новое качество и высокие требования к их надёжности, можно оценить достаточно высоко.

Необходимой информации о технологии изготовления зарубежных низковольтных стабилитронов не имеется до сих пор. Известны патенты на планарные диффузионно-сплавные и эпитаксиальные НВС [104, 105]. Опубликованы данные, свидетельствующие о том, что имеется принципиальная возможность изготовления НВС на основе *p-n*-переходов, полученных способом ионного легирования [46]. В этом случае применяется специальная конструкция с охранным *p-n*-переходом не только по краевой, но и под центральной частью –

омическим контактом структуры (см. рисунок 1.4 д), что существенно ограничивает возможность использования площади кристалла, в частности, для управления параметрами НВ p - n -структур с туннельным механизмом пробоя, используя для этого нелинейную зависимость напряжения туннельного пробоя ($U_{\text{проб.т.}}$) от площади p - n -перехода (S_{p-n}).

Интерес представляет информация о технологиях формирования НВ p - n -структур фирмой Thomson Semiconducteurs [106], рисунки 3.1, 3.2. Однако реализация представленных в [106] технологий при существующем состоянии отечественной электронной промышленности не представляется возможной в силу экономических факторов и достаточно узкого внутреннего рынка низковольтных ППП: требуется приобретение современного технологического оборудования и проведения работ по созданию новых технологических процессов. И, по-видимому, неактуальна, в т.ч. потому, что представленные технологии рассчитаны на получение p - n -структур только с напряжениями пробоя $U_{\text{проб}} \geq 4,3$ В. Разработанная в диссертации технология высококонцентрационной диффузии As обеспечивает получение требуемых НВ p - n -структур с $U_{\text{проб}} \geq 2,0$ В.

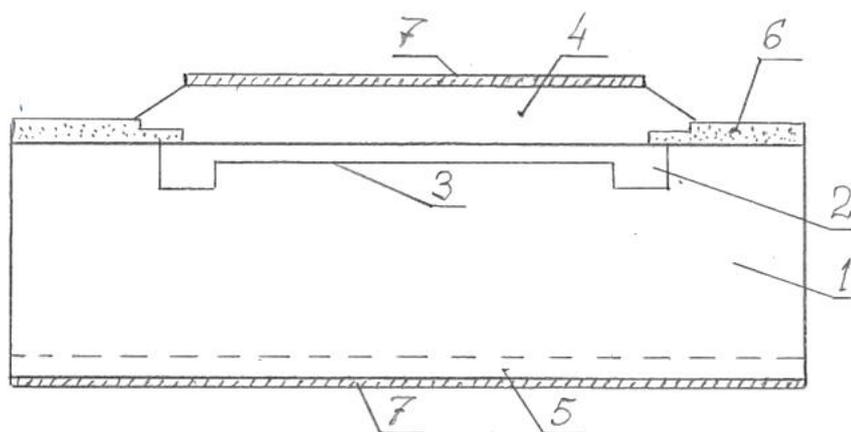


Рисунок 3.1 – Структура кристалла НВ стабилитрона, изготовленного по технологии локальной эпитаксии: 1 – кремний n -типа проводимости; 2 – охранный p - n -переход; 3 – основной НВ p - n -переход; 4 – эпитаксиальный кремний p^{++} -типа проводимости; 5 – диффузия фосфора; 6 – оксид кремния; 7 – омические контакты (Ag)

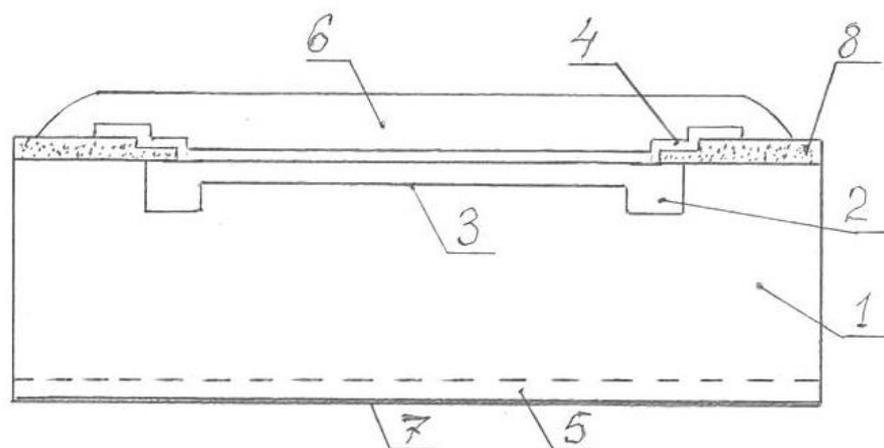


Рисунок 3.2 – Структура кристалла НВ стабилитрона, изготовленного по технологии локальной p^+ - диффузии: 1 – кремний n -типа проводимости; 2 – охранный p - n -переход; 3 – основной НВ p - n -переход; 4 – поликремний, легированный бором; 5 – n^+ -диффузия; 6 – серебрянный контакт (гальваническое осаждение Ag); 7 – омический контакт (напылённый Ag); 8 – оксид кремния

Результатам разработки НВ диффузионных p - n -структур с туннельным и смешанным механизмами пробоя, полученных высококонцентрационной диффузией As в сильнолегированный кремний p -типа проводимости, и решения на этой основе целевой задачи получения НВ стабилитронов по планарно-диффузионной технологии предшествовали попытки исследования с этой целью возможности получения надёжных НВ диффузионных p - n -структур ещё по нескольким возможным вариантам, т.е. по технологии “диффузия в диффузию”.

В частности: диффузией бора в слой сильнолегированного фосфором кремния, фосфора в сильнолегированную бором подложку, рисунки 3.3, 3.4.

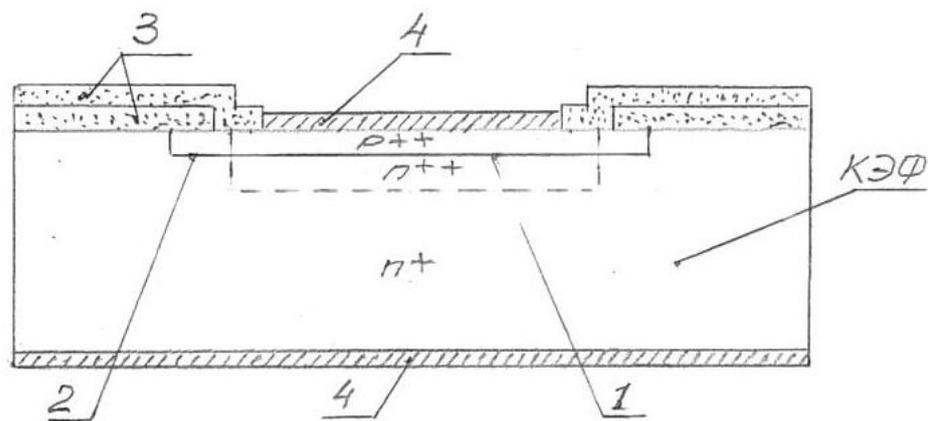


Рисунок 3.3 – Структура кристалла с НВ $p^{++}-n^{+}$ - переходом, полученным диффузией бора в сильнолегированный диффузионный n^{++} - слой в кремнии n - типа проводимости: 1 – диффузионный $p^{++}-n^{++}$ - переход; 2 – охранный $p^{++}-n^{+}$ - переход; 3 – оксид кремния; 4 – омические контакты

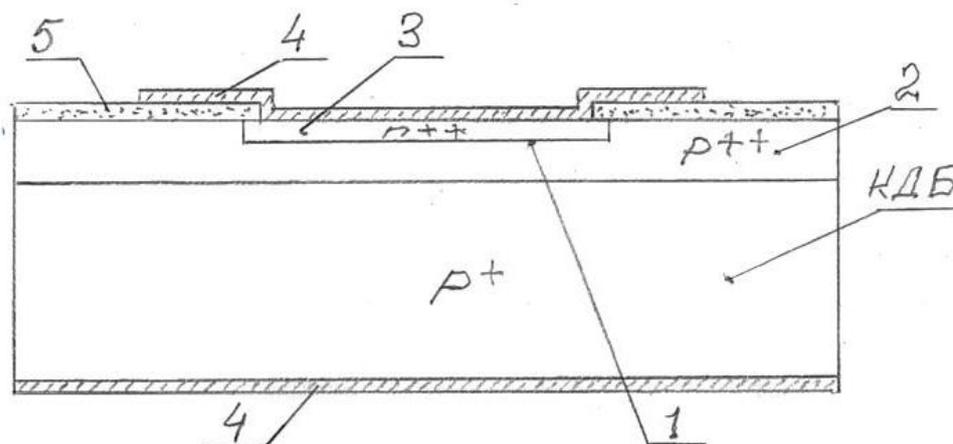


Рисунок 3.4 – Структура кристалла с НВ $n^{++}-p^{++}$ - переходом, полученным диффузией фосфора в сильнолегированный кремний p -типа проводимости: 1 – $n^{++}-p^{++}$ - переход; 2 – оксид кремния; 3 – омический контакт

Маршрут изготовления “резких” НВ диффузионных p - n -структур диффузией бора в диффузионный слой сильнолегированного фосфором кремния (“двойная диффузия”), выглядит следующим образом, рисунок 3.5.

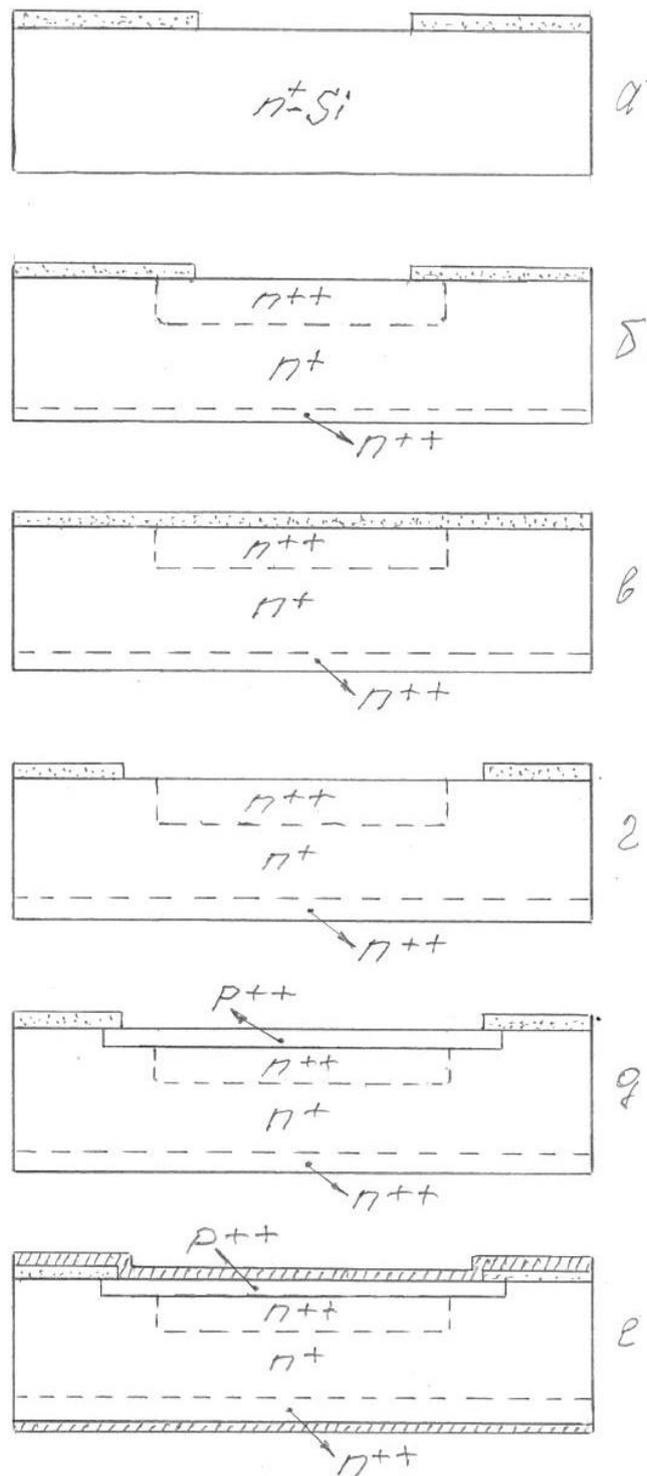


Рисунок 3.5 – Маршрут изготовления “резких” НВ диффузионных $p^{++}-n^{++}-$ структур диффузией бора в диффузионный слой сильнолегированного фосфором кремния: а – фотолитография по первому слою оксида кремния; б – высококонцентрационная диффузия фосфора; в – удаление первого слоя оксида кремния, нанесение второго слоя оксида кремния; г – фотолитография по второму слою оксида кремния; д – высококонцентрационная диффузия бора; е – нанесение омических контактов

Также исследована возможность получения аналогичным образом НВ диффузионных $p^{++}-n^{++}$ - структур диффузией фосфора в сильнолегированный бором кремний.

Нужно отметить, что в структуре кристалла с НВ $p^{++}-n^{++}$ -переходом (рисунок 3.3) формируется практически охранный $p^{++}-n^{++}$ -переход (2) с напряжением пробоя, превышающем напряжение пробоя основного $p^{++}-n^{++}$ -перехода. Т.е. исследуемый основной $p^{++}-n^{++}$ -переход следует рассматривать как переход со скрытой структурой, что может обеспечить ему дополнительные преимущества по сравнению с $p-n$ -переходами, выходящими на поверхность кристалла, с защитой оксидом кремния. Благодаря этому, в данном случае можно рассчитывать на получение истинных, не искажённых параметрами состояния поверхности подложки и качеством оксидной защиты, значений величины напряжения пробоя исследуемых $p^{++}-n^{++}$ -переходов.

По расчёту для получения диффузионных $p-n$ -структур с напряжениями пробоя в области от 3 В до 6 В концентрация легирующей примеси в p -подложке должна быть на уровне от $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ до $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, что соответствует удельным сопротивлениям порядка 0,001 Ом·см. Уровень 0,001 Ом·см – предел возможности для промышленного кремния. Возможность изготовления НВ $p-n$ -структур диффузией фосфора исследована с использованием промышленного кремния p -типа проводимости КДБ 0,001, КДБ 0,002 и опытного кремния КДБ 0,0003 Ом·см, изготовленного по договору с предприятием-изготовителем.

В результате, для обоих исследованных вариантов изготовления диффузионных НВ $p-n$ -структур получены НВ $p^{++}-n^{++}$ -, $n^{++}-p^{++}$ - структуры с напряжениями пробоя в требуемом диапазоне – $U_{\text{проб}}$ (2 – 5) В, рисунок 3.6.

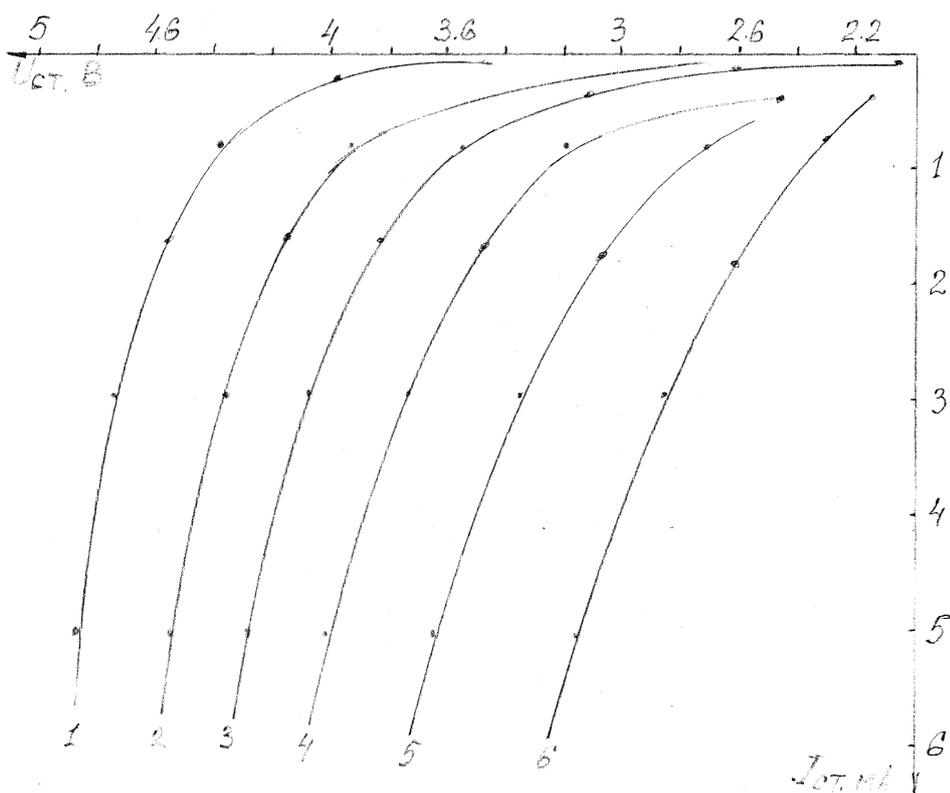


Рисунок 3.6 – Типичные вольт-амперные характеристики нВ $p^{++}-n^{++-}$, n^{++-} - p^{++} - структур, полученных диффузией бора в слой сильнолегированного фосфором кремния / фосфора в сильнолегированную бором подложку

Плавный характер зависимости $U_{\text{проб}}(I_{\text{ст}})$ в диапазоне исследуемых напряжений пробоя свидетельствует о туннельном характере пробоя таких структур с присущим ему равномерным распределением тока по площади p - n -перехода. На рисунке 3.7 представлена зависимость напряжения пробоя ($U_{\text{проб}}$) n^+ - p^+ -переходов, изготовленных по технологии «диффузия в диффузию», от площади p - n -перехода (S_{p-n}).

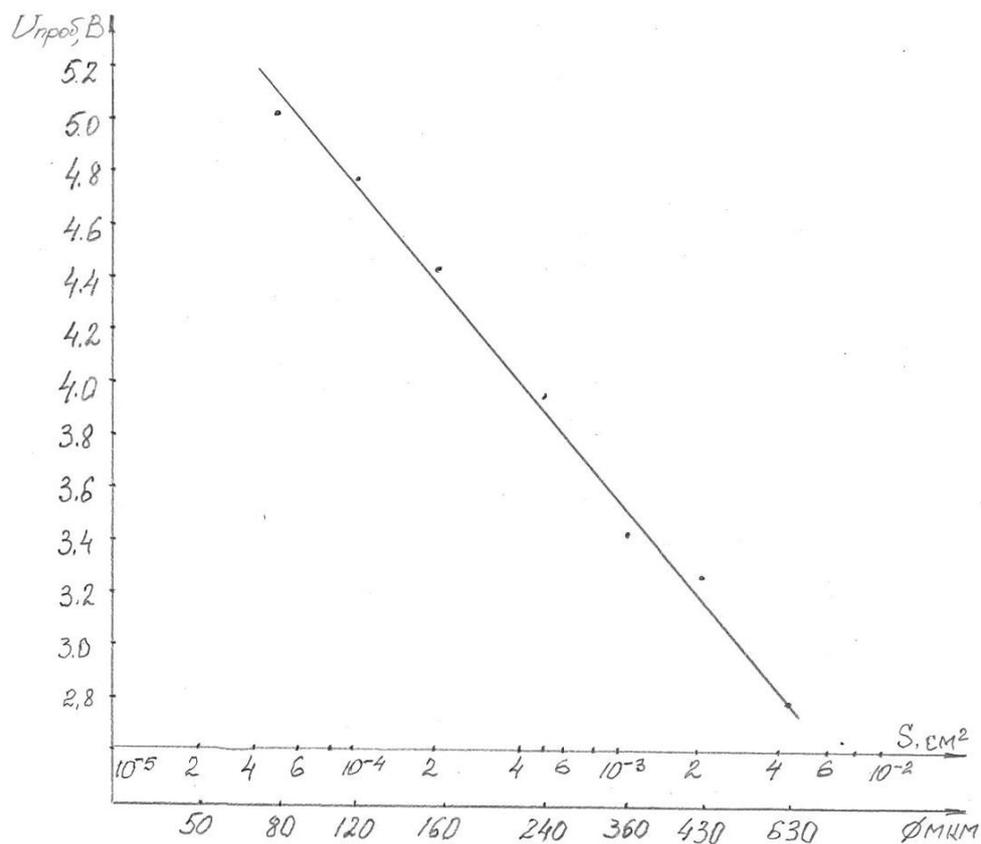


Рисунок 3.7 – Экспериментальная зависимость напряжения пробоя кремниевых $p^{++}-n^{+}$ - структур от площади $p-n$ -перехода / диаметра “окна” под диффузию в защитном оксиде кремния

При исследовании $p-n$ -структур с различной площадью $p-n$ -перехода отмечается, что начиная с площади $4,5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ ($\varnothing 240$ мкм) и менее резко возрастает разброс величин напряжения стабилизации и дифференциальных сопротивлений. Объяснение этому эффекту состоит, возможно, в том, что, в случае газотранспортных реакций, обеспечить технологически воспроизводимый, равномерный доступ диффундирующих реагентов к ограниченной области полупроводника – к “окну” с маленьким диаметром в защитном оксиде кремния достаточно сложно. Для обеспечения однородности фронта диффузии в полупроводнике по площади применяются специальные технологические средства / приспособления в конструкции кварцевой диффузионной трубы, создающие в зоне реакции турбулентность / однородность газового потока (азот), несущего диффузانت.

Однако результаты получения НВ диффузионных *p-n*-структур по названным вариантам следует признать неудовлетворительными по причине неприемлемо малой глубины залегания *p-n*-переходов ($x_j < 1$ мкм), что требует решения так называемой проблемы малопроникающих омических контактов к *p-n*-структуре. Это отражается на надёжности даже таких приборов как стабилитроны, тем более неприемлемо для силовых приборов защиты – ограничителей напряжения со специфическими требованиями по $x_j > 10$ мкм.

Можно указать также на недостаточную воспроизводимость параметров НВ *p-n*-структур, получаемых на основе технологий “диффузия в диффузию”.

3.2 Разработка планарно-диффузионной технологии изготовления низковольтных стабилитронов

Промышленная технология изготовления отечественных низковольтных стабилитронов разработана на основе результатов разработки и исследования в настоящей диссертационной работе НВ диффузионных *p-n*-структур с туннельным и смешанным механизмами пробоя, изготавливаемых по технологии высококонцентрационной диффузии As. Типичный маршрут изготовления кристалла планарно-диффузионного стабилитрона на основе технологии диффузии мышьяка, рисунок 3.8, выглядит следующим образом:

1. Запуск пластин кремния марки КДБ;
2. Химическая обработка;
3. Окисление;
4. Фотолитография I;
5. Химическая обработка;
6. Осаждение фосфора из PCl_3 ;
7. Снятие фосфоросиликатного стекла;
8. Химическая обработка;
9. Перераспределение фосфора;
10. Пассивация фосфоросиликатным стеклом;
11. Термообработка;
12. Осаждение поликремния;

13. Термообработка;
14. Фотолитография II;
15. Диффузия мышьяка;
16. Фотолитография III (2 рабочая сторона);
17. Химическая обработка;
18. Напыление металлизации V, Ag;
19. Фотолитография IV;
20. Серебрение гальваническое;
21. Стравливание;
22. Измерение параметров.

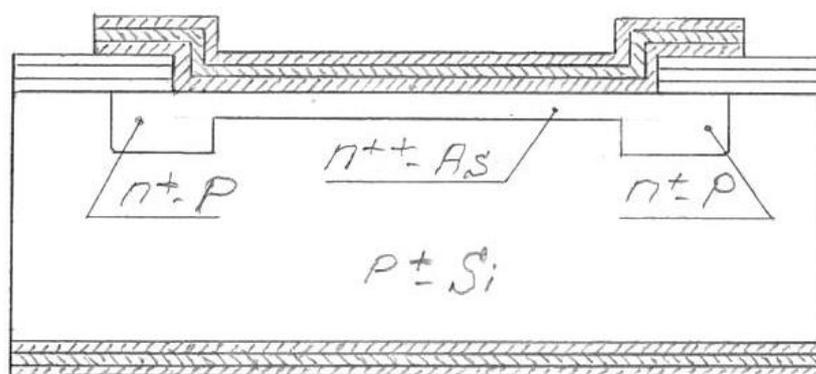


Рисунок 3.8 – Структура кристалла типичного стабилизатора, изготовленного по технологии диффузии мышьяка.

3.3 Разработка, исследование и внедрение планарно-диффузионных низковольтных стабилизаторов в серийное производство

Первыми на основе технологии получения НВ *p-n*-структур высококонцентрационной диффузией As в эвакуированном реакторе (откачанная до низкого давления герметизированная кварцевая ампула) из неограниченного источника диффузии разработаны и внедрены в производство АО «НЗПП с ОКБ» две серии низковольтных стабилизаторов в безкорпусном исполнении с напряжениями стабилизации от 2,4 до 5,6 В.

Первая серия стабилитронов 2С147Т-1 ÷ 2С156Т-1 с напряжениями стабилизации 4,7 В, 5,1 В, 5,6 В, лежащими в области смешанного механизма пробоя, таблица 3.1 [107, 108]:

Таблица 3.1 – Основные параметры стабилитронов 2С147Т-1 ÷ 2С156Т-1

№ п/п	Наименование стабилитрона	$U_{ст}$, В, при $I_{ст} = 3$ мА при 30°С	$I_{обр}$, мкА, при $U_{обр} = 1$ В при 298 К	r_d , Ом, при $I_{ст} = 0,25$ мА при 298 К	$\alpha U_{ст}$, %/°С, в диапазоне температур (213-398) К
1	2С147Т-1	4,7	7,5	220	минус 0,08
2	2С147У-1	4,7	5,0	220	минус 0,08
3	2С151Т-1	5,1	4,0	180	от минус 0,06 до + 0,03
4	2С156Т-1	5,6	2,0	160	от минус 0,04 до + 0,06
5	2С156У-1	5,6	1,0	160	до + 0,06

Временная нестабильность напряжения стабилизации $\rightarrow \pm 1,5$ %.
Минимальный ток стабилизации $\rightarrow 0,25$ мА. Рабочий диапазон температур \rightarrow от минус 60°С до 125°С

Отметим, что знак температурного коэффициента напряжения стабилизации стабилитронов 2С156Т-1 меняет направленность в области разброса номинальных значений напряжений стабилизации, что соответствует переходу от смешанного к туннельному механизмам пробоя (см. рисунок 1.8). Вольтамперные характеристики носят плавный характер и полностью повторяют представленные на рисунках 2.35, 3.6 ВАХ зарубежных аналогов и экспериментальных планарно-диффузионных *p-n*-структур.

Затем разработана серия стабилитронов 2С124Д-1 ÷ 2С143Д-1 с напряжениями стабилизации 2,4, 2,7, 3,0, 3,3, 3,6, 3,9, 4,3 Вольт, т.е. с преобладающим механизмом туннельного пробоя, таблица 3.2 [107, 109].

Таблица 3.2 – Основные параметры стабилитронов 2С124Д-1 ÷ 2С143Д-1

№ п/п	Наименование стабилитрона	$U_{ст}$, В, при $I_{ст} = 3$ мА при 303 К	$I_{обр}$, мкА, при $U_{обр} = 1$ В при 298 К	r_d , Ом, при $I_{ст} = 0,25$ мА при 298 К	$\alpha U_{ст}$, %/°С, в диапазоне температур (213-398) К
1	2С124Д-1	2,4	7,5	1200	минус 0,075
2	2С127Д-1	2,7	5,0	1250	минус 0,075
3	2С130Д-1	3,0	4,0	1300	минус 0,075
4	2С133Д-1	3,3	2,0	1400	минус 0,075
5	2С136Д-1	3,6	1,0	1500	минус 0,070
6	2С139Д-1	3,9	0,8	1600	минус 0,065
7	2С143Д-1	4,3	0,6	1650	минус 0,060

Временная нестабильность напряжения стабилизации $\rightarrow \pm 1,5$ %.
Спектральная плотность шума, частота от 20 Гц до 1 МГц $\rightarrow 0,3$ мкВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$.
Постоянное прямое напряжение при 298 К и $I_{пр} = 10$ мА $\rightarrow 0,9$ В. Минимальный ток стабилизации $\rightarrow 0,25$ мА. Рабочий диапазон температур \rightarrow от минус 60°С до 125°С

Отметим, что значения температурного коэффициента напряжения стабилизации стабилитронов 2С124-Д1 ÷ 2С143-Д1 отрицательны, что соответствует характеру туннельного механизма пробоя. Вольтамперные характеристики носят плавный характер и полностью повторяют представленные на рисунках 2.35, 3.6 ВАХ зарубежных аналогов и экспериментальных планарно-диффузионных *p-n*-структур.

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 стабилитронов для целенаправленного получения заданных по параметру U_{cm} групп приборов оказалось возможным применить, помимо управляющего параметра $\rho_v(N_B)$ (см.

рисунок 2.27), параметр S_{p-n} (см. рисунок 2.32). Это позволило для изготовления семи указанных групп стабилитронов использовать, варьируя параметром S_{p-n} , кремний только трех марок – КДБ 0,001, КДБ 0,002 и КДБ 0,003. В качестве омического контакта применена типовая металлизация Ti-Ni-Au, обеспечивающая требования надежности для достигаемой достаточно большой (3÷4) мкм глубины залегания НВ диффузионных $p-n$ -переходов. В маршруте изготовления стабилитронов присутствует также операция коррекции параметров по способу НТ отжига при температуре 500°C в течение (1÷3) ч. в основном – на стадии изготовления пластин со структурами для повышения напряжения стабилизации. Однажды операция коррекции величины $U_{ст}$ в сторону снижения на 0,05 В отжигом при температуре 950°C применена с положительным результатом для большой партии НВ стабилитронов в стеклянном корпусе КД-2.

Отметим также, что аналогичным образом обеспечивается “прецизионный” разброс величины U_{cm} (± 2 %) для серийных нетермокомпенсированных стабилитронов 2С135А с U_{cm} 5,1 В, разработанных также по технологии высококонцентрационной диффузии As.

В конструкции безкорпусных стабилитронов первой серии (2С147Т-1 ÷ 2С156Т-1), с учётом того, что здесь – область смешанного механизма пробоя, введён охранный $p-n$ -переход. Можно отметить, что и кристалл зарубежных НВ стабилитронов содержит охранный $p-n$ -переход, начинающая с напряжений пробоя 4,3 В, см. рисунки 3.1, 3.2 [106]. Охранный $p-n$ -переход формируется диффузией фосфора в режиме осаждения 1030°C, 60 мин и распределения примеси в потоке сухого $O_2 \rightarrow 1200^\circ C$, 4 ч. Во второй серии от охранного перехода отказались в связи с тем, что, $p-n$ -переходы с преобладающим туннельным пробоем не чувствительны к дефектам структуры и пробой в них происходит по всей площади равномерно вне зависимости от кривизны краевой части $p-n$ -перехода в месте его выхода на поверхность кремния. Эти выводы были подтверждены положительными результатами исследований и испытаний на надежность (до 5000 часов) экспериментальных образцов $p-n$ -структур с преобладающим туннельным пробоем без охранного перехода.

В простейшей планарной конструкции стабилитронов на основе сильнолегированного p -Si можно говорить о некоторой охранной роли эффекта обеднения бором приповерхностного слоя кремниевой подложки при движении вглубь кремния границы раздела Si-SiO₂ в процессе окисления, за счет присущего бору свойства перераспределения в защитный оксид кремния вследствие низкой величины равновесного коэффициента сегрегации: $K = N_{B.si} / N_{B.sio2} < 1$, где $N_{B.si}$, $N_{B.sio2}$ – концентрации бора, соответственно, в кремнии и оксиде кремния [23].

В последующем на основе технологии диффузии As разработан ряд серий НВ стабилитронов общего и специального применения в различном корпусном исполнении с напряжениями стабилизации от 2,0 В до 6,2 В, а также прецизионные НВС с низким разбросом напряжения стабилизации 2С151А, 2С235А с $U_{ст}$ 5,1 В $\pm 2\%$, 9,1 В $\pm 2\%$ при $I_{ст} = 50$ мкА и с обратным током в наноамперном диапазоне (< 50 нА), рисунок 3.7 (фото):

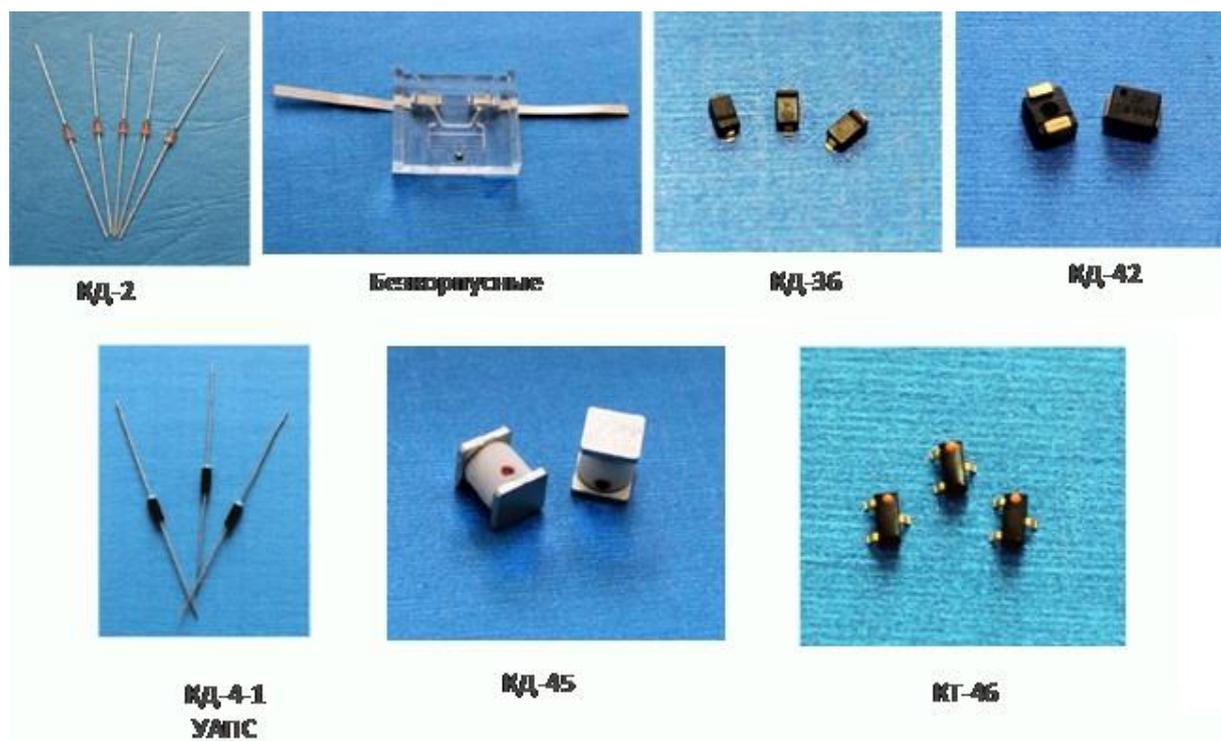


Рисунок 3.7 – Образцы НВ стабилитронов в безкорпусном и корпусном исполнениих, в т.ч. в корпусах для поверхностного монтажа (SMD) разработанных в ОКР «Вольт-И8» по Государственной Программе «Развитие оборонно-промышленного комплекса 2017», и внедрённых в серийное производство АО «НЗПП с ОКБ» [110]

Все разработанные на основе НВ диффузионных $p-n$ -переходов планарные стабилитроны идентичны по основным электрическим параметрам аналогичным зарубежным НВ стабилитронам, например, фирм Motorola, Littele Fuse и др. (см. рисунок 2.35). Потребность в НВ стабилитронах составляет сотни тысяч штук в год.

Выводы к главе 3

1. Из результатов анализа литературных данных по технологии и конструированию НВ стабилитронов следует, что наиболее вероятными технологиями их изготовления зарубежными фирмами являются 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.

2. На основании результатов разработанной в диссертации технологии получения НВ $p-n$ -структур высококонцентрационной диффузией As в эвакуированном реакторе из неограниченного источника, разработана промышленная технология изготовления НВ стабилитронов, разработаны, исследованы и внедрены в серийное производство ряд серий НВ стабилитронов с напряжениями стабилизации от 2 до 5,6 В в безкорпусном исполнении и в корпусах для навесного и поверхностного монтажа.

3. Впервые в практике конструирования стабилитронов для целенаправленного получения заданных (по параметру напряжение стабилизации U_{cm}) типоминалов стабилитронов применён, помимо типовых управляющих факторов – удельное сопротивление подложки (ρ_v , Ом·см), режим диффузии ($T^\circ\text{C}$, t ч.), фактор площади $p-n$ -перехода (S_{p-n} см²).

4. Впервые в практике конструирования стабилитронов для целенаправленного получения прецизионных по параметру U_{cm} типоминалов приборов применены НТ отжиги НВ $p-n$ -структур в пластинах и НВ стабилитронов в стеклянных корпусах при температуре 500°C.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННЫХ И ПРЕЦИЗИОННЫХ ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННЫХ СТАБИЛИТРОНОВ

Полученные в результате разработки диффузионной технологии изготовления НВ *p-n*-переходов базовые зависимости электрических параметров *p-n*-структур от параметров кремниевой подложки и режимов диффузии и таких конструктивных факторов как площадь *p-n*-перехода и таких технологических эффектов как НТ отжиг *p-n*-структур с туннельным и смешанным механизмами пробоя, обеспечивающий тонкую корректировку напряжения пробоя *p-n*-перехода, послужили основой создания базовых технологий конструирования, разработки и внедрения в серийное производство ряда серий НВ термокомпенсированных стабилитронов (НВ ТКС) КС405А, КС405Б; серии прецизионных термокомпенсированных стабилитронов (НВ ПТКС), 2С198А÷2С198К; серии ультра-прецизионных термокомпенсированных стабилитронов (УАПС) – 2СП101А ÷ 2СП501Д (16 типономиналов), в т.ч. аттестуемых 2СП301А – класса 0,0002, 2СП401В – класса 0,0003, 2СП401А – класса 0,0005 в корпусном и безкорпусном исполнениях, в т.ч. в корпусах для поверхностного монтажа [108 – 121].

Прецизионные ТКС при токах стабилизации 200 мкА применены в качестве базовых элементов конструкции в разработках прецизионных интегральных источников опорного напряжения (ИОН) типов 1380ЕС013, 1380ЕН014, 1394ЕС013, 1380ЕС025 ÷ 1380ЕС065 [122 - 124].

4.1 Принцип термокомпенсации низковольтных стабилитронов

Термокомпенсированные (ТКС), прецизионные термокомпенсированные (ПТКС), аттестуемые ультрапрецизионные термокомпенсированные стабилитроны (УАПС), устойчивые к воздействию таких дестабилизирующих факторов окружающей среды как температура и радиация, сохраняющие высокую стабильность электрических параметров в течение длительного времени, чрезвычайно востребованы в качестве прецизионных источников опорного напряжения в системах обработки информации, аналого-цифровых и цифро-

аналоговых преобразователях, устройствах дальней радионавигации и управления, калибраторах напряжения и тока, в высокоточной измерительной технике, в частности, для создания эталонных мер напряжения (эталон Вольта), и, наконец, – в командных приборах систем управления РТ и РКТ.

Значительные успехи в этой области достигнуты в своё время предприятием ПАО «НПП «Сапфир» (приемник ныне – АО «ОПТРОН»): стабилитроны 2С108, 2С117 [125, 126].

Однако уровень прецизионности функциональных параметров этих ПТКС недостаточен, чтобы удовлетворить возросшие требования современной высокоточной техники.

Ограничения для АО «ОПТРОН» в развитии этого чрезвычайно актуального направления ЭКБ объясняются, прежде всего, недостаточным уровнем технологии получения НВ *p-n*-структур, которой они располагают, и, по-видимому, ликвидацией в 2005 г. специализированного метрологического центра высочайшего уровня, принадлежавшего ранее ПАО «НПП «САПФИР» и возглавлявшегося Булахом А.Е. [127].

Ниже представлены результаты исследований и разработки ТКС, ПТКС и УАПС на основе технологии диффузии As.

На рисунке 4.1 представлена кривая зависимости температурного коэффициента напряжения пробоя НВ *p-n*-переходов ($dU_{\text{проб}}/dT$) в диапазоне напряжений пробоя от 2 В до 10 В, соответствующая теории туннельного и лавинного механизмов пробоя [106].

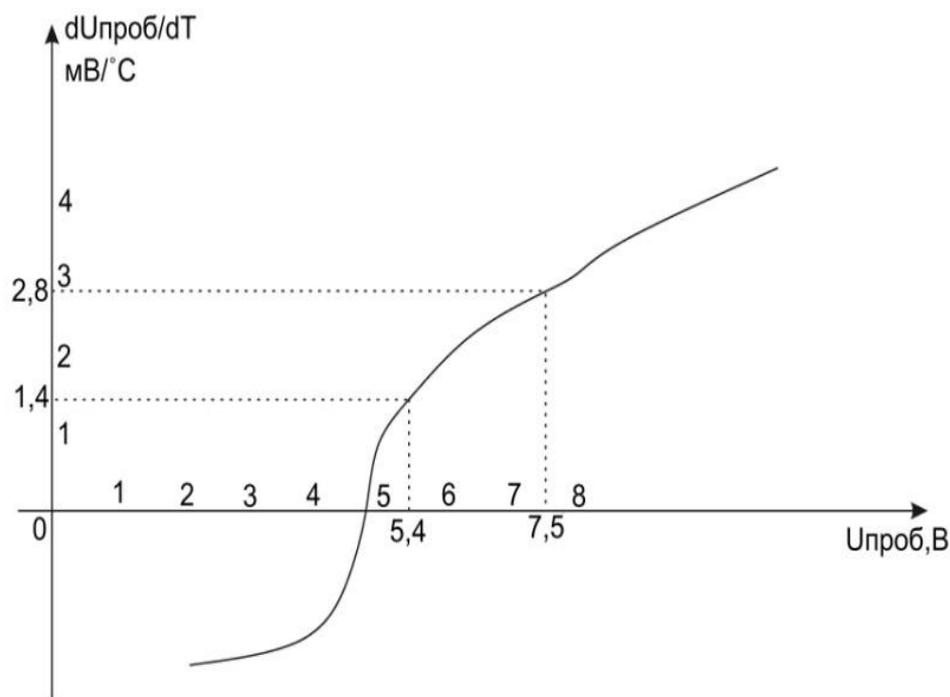


Рисунок 4.1 – Поведение температурного коэффициента напряжения пробоя низковольтных $p-n$ -переходов [106]

Термокомпенсированный стабилитрон с напряжением стабилизации (U_{cm}) $\sim 6,2$ В представляет собой схему последовательного включения $p-n$ -перехода при обратном смещении (основной $p-n$ -переход) с напряжением пробоя ($U_{проб.о.}$) $\sim 5,6$ В и прямосмещённого $p-n$ -перехода (компенсирующий $p-n$ -переход) с падением прямого напряжения ($U_{пр.к.}$) $\sim 0,6$ В. Такая схема позволяет скомпенсировать положительный температурный коэффициент основного $p-n$ -перехода ($\alpha U_{проб.о.}$) отрицательным температурным коэффициентом прямого падения напряжения с тем же по модулю значением на компенсирующем $p-n$ -переходе ($\alpha U_{пр.к.}$):

$$\alpha U_{cm} = (+)U_{проб.о} + (-)\alpha U_{пр.к.} \rightarrow 0 \quad (4.1)$$

Разработанная технология получения НВ $p-n$ -структур на основе процесса диффузии As позволила предложить оригинальную технологию получения НВ термокомпенсированных стабилитронов (НВ ТКС) и разработать широкую номенклатуру НВ ТКС, как общего, так и специального применения, с напряжением стабилизации (U_{cm}) на уровне (6,1–6,3) В, с величиной температурного коэффициента напряжения стабилизации (αU_{cm}) вплоть до 0,0001

$\%/^{\circ}\text{C}$ (1 ppm) и долговременной нестабильностью напряжения стабилизации (δU_{cm}) вплоть до $0,0002\%$ (2 ppm) за 1000 ч, с напряжением НЧ шума менее 2 мкВ и нелинейностью температурной зависимости напряжения стабилизации ($\Delta U_{л.ст.}$) менее 100 мкВ.

Основные параметры термокомпенсированного стабилитрона (ТКС):

U_{cm} , В, – напряжение стабилизации при заданном токе стабилизации;

I_{cm} , мА, – ток стабилизации;

αU_{cm} , $\%/^{\circ}\text{C}$, ppm – температурный коэффициент напряжения стабилизации в заданном диапазоне температур:

$$\alpha U_{ст} = \frac{(U_{ст2} - U_{ст1}) \cdot 100}{U_{ст1} \cdot (T_2 - T_1)}, \quad (4.2)$$

где $U_{cm.1}$ – напряжение стабилизации при температуре T_1 ; $U_{cm.2}$ – напряжение стабилизации при температуре T_2 ;

δU_{cm} , мкВ – временная нестабильность напряжения стабилизации;

$\Delta U_{л.ст.}$, мкВ, – нелинейность температурной зависимости напряжения стабилизации в заданном диапазоне температур:

$$\Delta U_{л. ст.} = (U_{ст2} - U_{ст1}) - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_1} (U_{ст3} - U_{ст1}), \quad (4.3)$$

где U_{cm1} – напряжение стабилизации при температуре T_1 ; U_{cm2} – напряжение стабилизации при температуре T_2 ; U_{cm3} – напряжение стабилизации при температуре T_3 ;

U_w , мкВ – размах НЧ шумов при заданном токе стабилизации;

r_{cm} , Ом, – дифференциальное сопротивление при заданном $I_{ст}$.

С увеличением температуры величина ТКН основного p - n -перехода начинает падать, поэтому подобрать пару основного и компенсирующего p - n -переходов для полной компенсации прибора в широком диапазоне температур невозможно.

Если при низких температурах можно добиться полной компенсации ТКН обоих p - n -переходов, то при высоких температурах происходит перекомпенсация, и суммарный ТКН термокомпенсированного стабилитрона будет иметь отрицательное значение.

Т.о., рассчитывать на теоретические представления о поведении температурных параметров обратно- и прямосмещённых НВ *p-n*-переходов с целью расчёта НВ термокомпенсированного стабилитрона, тем более прецизионного, т.е. с итоговым ТКН близким к нулю, не приходится.

В результате, при разработке термокомпенсированных стабилитронов целесообразно привлечение феноменологической методики расчёта ТКС, учитывающей экспериментальные значения ТКН основного и компенсирующего *p-n*-переходов в достаточно узком, рабочем диапазоне температур. В случае ТКС типов КС405, 2С198 – диапазон минус 10°С ÷ + 65°С.

4.1.1 Температурная зависимость напряжения пробоя основного *p-n*-перехода

Величина температурного коэффициента напряжения пробоя ($\alpha U_{проб}$) в области смешанного пробоя претерпевает плавный переход от отрицательных к положительным значениям, и в области напряжений пробоя ~4,7 В переходит через ноль, см. рисунок 4.1 [106]. Температурный коэффициент напряжения пробоя основного *p-n*-перехода термокомпенсированного стабилитрона ($\alpha U_{проб.о.}$) с напряжением пробоя ~5,6 В – величина положительная.

4.1.2 Температурная зависимость прямого падения напряжения на компенсирующем *p-n*-переходе

Анализ базовой зависимости прямого падения напряжения на *p-n*-переходе ($U_{пр.}$) от прямого тока ($I_{пр.}$): $I_{пр.} = I_{обр.} \cdot e^{qU_{пр.}/kT}$, – свидетельствует об уменьшении $U_{пр.}$ с ростом температуры для $I_{пр.} = const$, рисунок 4.1 [122].

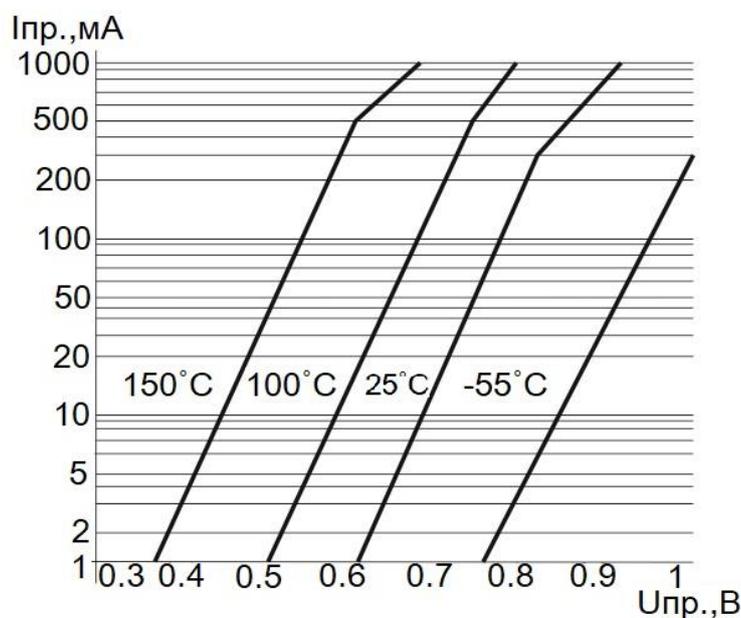


Рисунок 4.2 – Типичные прямые ВАХ диодов Зенера в зависимости от температуры [122]

Соответственно, температурный коэффициент прямого падения напряжения на компенсирующем $p-n$ -переходе ($\alpha U_{пр.к.}$) – величина отрицательная и может располагаться в диапазоне величин от минус 1.4 до минус 2 мВ/°С в зависимости от плотности тока через $p-n$ -переход, сопротивления растекания, сопротивления омических контактов и некоторых электрофизических свойств кремния – коэффициентов диффузии (D_n, D_p) и времён жизни носителей (τ_n, τ_p), концентраций носителей заряда n -, p -типов проводимости.

4.1.3 Температурная зависимость напряжения стабилизации термокомпенсированного стабилитрона

Близкий по значению к нулю ТКН термокомпенсированного стабилитрона ($\alpha U_{см.}$) определяется суммой равных по величине и противоположных по знаку ТКН основного и компенсирующего $p-n$ -переходов. Подобрать пару основного и компенсирующего $p-n$ -переходов для полной компенсации в рабочем диапазоне температур (минус 60°С ÷ 125°С) невозможно. Если при низких температурах можно добиться полной компенсации ТКН обоих $p-n$ -переходов, то при высоких температурах происходит “перекомпенсация”, и суммарный $\alpha U_{см.}$ ТКС будет иметь

отрицательное значение. Т.е. на удовлетворительную компенсацию можно рассчитывать только в достаточно узком “рабочем” диапазоне температур.

Рассчитывать только на теоретические представления о поведении температурозависимых параметров обратно- и прямосмещённых НВ *p-n*-переходов при расчёте конструкции НВ ТКС, тем более прецизионного (ПТКС), т.е. с интегральным αU_{cm} близким к нулю, даже с принятым для ПТКС рабочим интервалом температур от 5°C до 60°C, не приходится.

В результате, при разработке термокомпенсированных стабилитронов целесообразно привлечение феноменологической методики расчёта ТКС, учитывающей экспериментальные зависимости ТКН основного и компенсирующего *p-n*-переходов (dU_o/dT , dU_k/dT), а также ещё одного важного температурозависимого параметра ТКС – нелинейности αU_{cm} в диапазоне температур ($\Delta U_{л.см.}$), в зависимости от плотности тока ($J_{см.}$).

4.2 Разработка, исследование и производство термокомпенсированных стабилитронов КС405А

Требования к электрическим параметрам термокомпенсированного стабилитрона КС-405А и аналога 1N4567 представлены в таблице 4.1:

Таблица 4.1 – Требования к электрическим параметрам термокомпенсированного стабилитрона КС-405

Стабилитрон	Корпус	$U_{см}$, В	$I_{см}$, мА	$\alpha U_{ст}$, %/°C (0 – 75)°C	r_d , Ом·см
КС405А	КД-2	6,2	0,5	0,002	200
1N4567	DO-35	6,4	0,5	0,002	200

Промышленная технология изготовления отечественных низковольтных термокомпенсированных стабилитронов создана на основе результатов разработки и исследования в настоящей диссертационной работе НВ диффузионных *p-n*-структур с туннельным и смешанным механизмами пробоя, изготавливаемых по технологии высококонцентрационной диффузии As в сильно легированный кремний *p*-типа проводимости (КДБ).

Разработка термокомпенсированного стабилитрона (ТКС) с напряжением стабилизации 6,2 В представляет собой комплексную задачу, включающую решение ряда физических, конструкционных и технологических задач. К основным из них следует отнести определение расчётным и экспериментальным путём оптимальных с точки зрения обеспечения электрических параметров ТКС параметров конструкции и технологии изготовления $n^{++}-p^{+}-n^{++}$ - структуры кристалла ТКС.

4.2.1 Феноменологическая методика расчёта термокомпенсированного стабилитрона

Разработка ТКС общего применения типа КС405А [111] проведена в порядке импортозамещения зарубежного аналога – термокомпенсированного стабилитрона 1N4567 ф.Thomson CSF [106] с целью обеспечения производства электронной автоматической телефонной станции ЭАТС МТ/20 по лицензии ф.Thomson CSF, для которой в г.Уфа была построена специализированная фабрика.

На рисунке 4.3 представлена конструкция кристалла термокомпенсированных стабилитронов 1N4567 в соответствии с [106], изготавливаемых по технологии локальной эпитаксии, в корпусе DO-35 (КД-2):

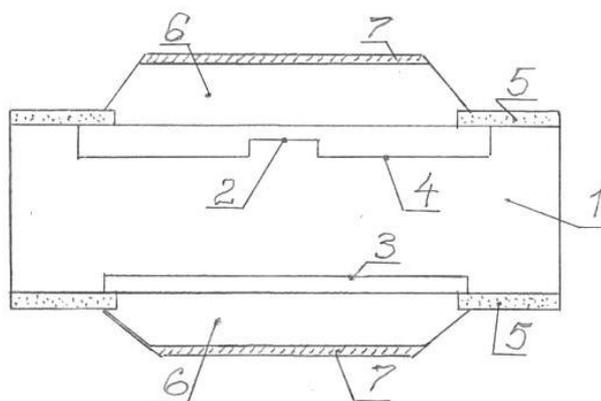


Рисунок 4.3 – Структура кристалла термокомпенсированного стабилитрона, изготавливаемого по технологии локальной эпитаксии в корпусе DO-35 (КД-2), ф.Thomson CSF [106]: 1 – кремний n -типа проводимости; 2 – основной p - n -переход; 3 – компенсирующий p - n -переход; 4 – охранный p - n -переход; 5 – оксид

кремния; 6 – эпитаксиальные выступы p -типа проводимости; 7 – омические контакты (Ag)

В основу технологии термокомпенсированных стабилитронов КС405А, разработанных в настоящей диссертационной работе, положена технология получения НВ p - n -структур, основанная на высококонцентрационном процессе диффузии As в сильно легированный p -кремний.

Так как номинальное напряжение стабилизации ТКС КС405А (итоговое напряжение стабилизации при последовательном соединении основного и компенсирующего p - n -переходов – $U_{ст.ткс.}$) должно быть 6,2 В при токе стабилизации 0,5 мА, а величина прямого напряжения на компенсирующем p - n -переходе, определяемая в основном контактной разностью потенциалов, составляет порядка (0,6-0,7) В для линейных p - n -переходов с концентрацией основной примеси в базе $\sim 10^{20} \text{см}^{-3}$, напряжение пробоя основного p - n -перехода должно быть порядка (5,5-5,6) В. Отметим, что это – p - n -переход со смешанным механизмом пробоя.

Нельзя назвать ни одной теоретической работы по созданию практической модели и методики расчёта ТКС, учитывающих поведение обратной и прямой ветвей ВАХ основного p - n -перехода в области рабочих температур при заданном токе стабилизации $I_{ст}$, тем более для основного p - n -перехода со смешанным механизмом пробоя.

Достаточно длительной высокотемпературной диффузией донорной легирующей примеси в кремний p -типа проводимости (КДБ) с концентрацией базовой примеси $\sim 10^{20} \text{см}^{-3}$ можно получить компенсирующий p - n -переход с напряжением пробоя не более 10 В. Целесообразность обеспечения высоких значений $U_{проб.комп.}$ определяется тем, что зависимость температурного коэффициента падения напряжения при прямом включении p - n -перехода от величины $U_{проб.комп.}$ имеет тенденцию к насыщению при возрастании величины $U_{проб.комп.}$ [129].

Расчёт конструкции кристалла ТКС типа КС405А базируется на определённой связи величины $U_{ст.ткс.}$, температурного коэффициента напряжения стабилизации ($\alpha U_{ст.ткс.}$) и плотности тока через основной $p-n$ -переход ($J_{ткс.о.}$).

На рисунке 4.4 представлена кривая зависимости температурного коэффициента напряжения пробоя основного $p-n$ -перехода ($\alpha U_{ст.осн.}$) от плотности тока ($J_{p-n.о.}$) в области эксплуатационных температур стабилитронов КС405А – $(0 \div 75)^\circ\text{C}$, построенная по данным из работы [129].

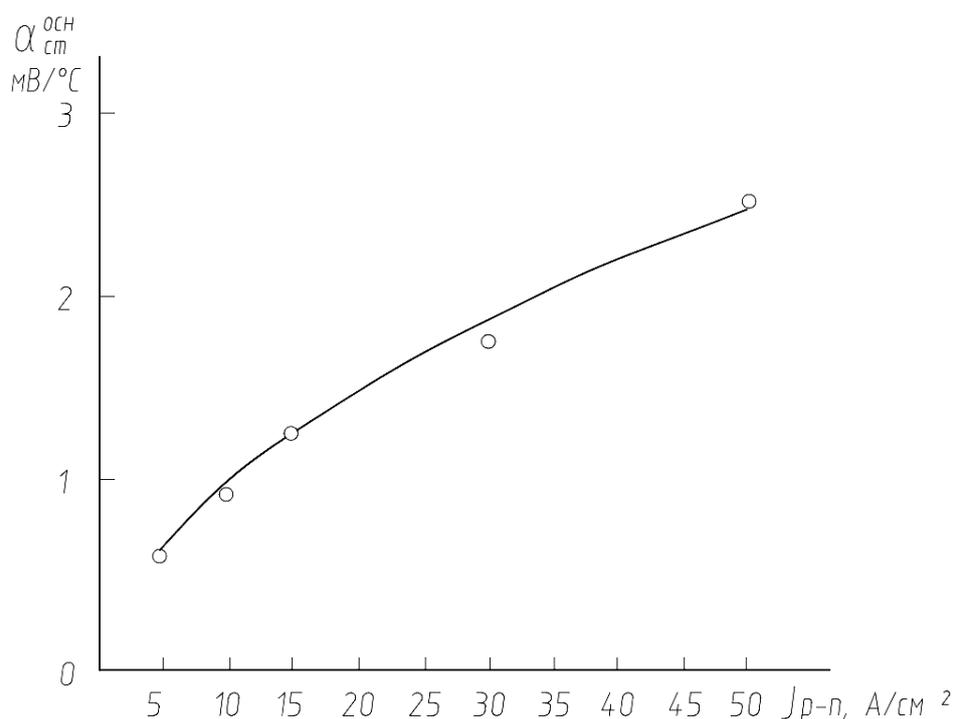


Рисунок 4.4 – Зависимость температурного коэффициента напряжения пробоя основного $p-n$ -перехода ($\alpha U_{ст.осн.}$) от плотности тока ($J_{p-n.о.}$). Экстраполяция данных [129]

На рисунке 4.5 представлены кривые зависимости температурного коэффициента напряжения пробоя компенсирующего $p-n$ -перехода ($\alpha U_{ст.комп.}$) от плотности тока ($J_{p-n.к.}$) для различных величин напряжений пробоя ($U_{ст.комп.}$):

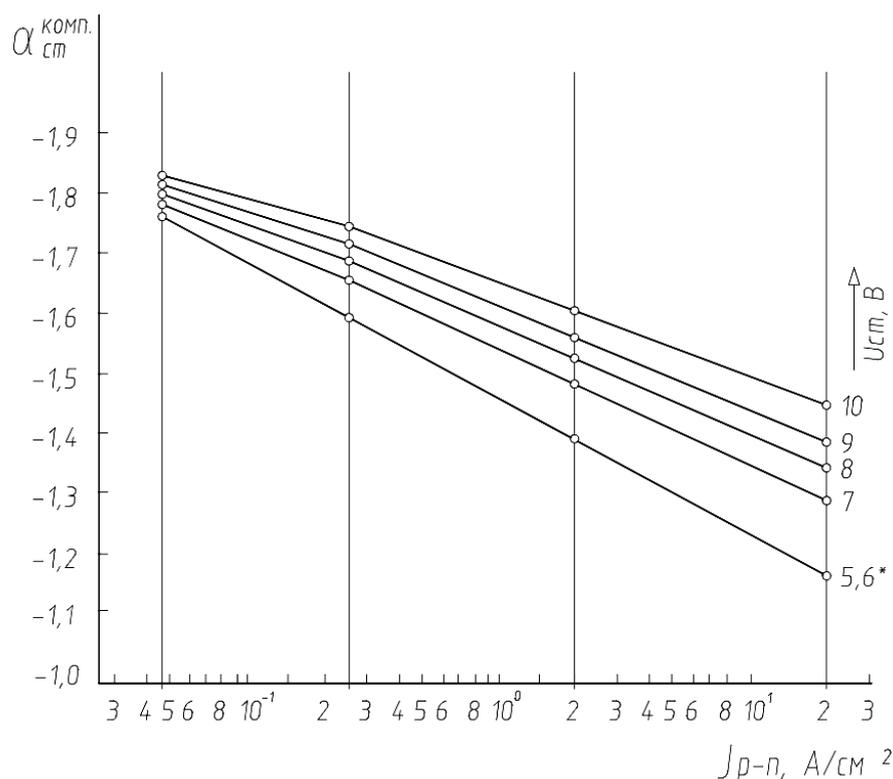


Рисунок 4.5 – Зависимость температурного коэффициента напряжения пробоя компенсирующего $p-n$ -перехода ($\alpha U_{ст.комп.}$) от плотности тока ($J_{p-n.o.}$) для различных величин напряжений пробоя ($U_{ст.комп.}$) по данным [129]

Для заданного тока стабилизации стабилитрона КС405А $I_{ст} = 0,5$ мА и максимальной площади $p-n$ -перехода в кристалле с размерами $0,55 \times 0,55$ мм², который возможно разместить в корпусе КД-2, $\rightarrow S_{p-n.к.} \approx 10^{-3}$ см² ($\varnothing S_{p-n.к.} \approx 360$ мкм), т.е. для плотности тока порядка $0,5$ А/см², величина температурного коэффициента напряжения пробоя компенсирующего $p-n$ -перехода ($\alpha U_{ст.комп.}$) располагается в области $(1,5 \dots 1,7)$ мВ/°С в зависимости от величины напряжения пробоя $U_{ст.комп.}$, рисунок 3.5. С учётом тенденции величины $\alpha U_{проб.комп.}$ к насыщению при возрастании величины $U_{проб.комп.}$ [129], целесообразно ориентироваться на значение величины $\alpha U_{ст.комп.}$ минус $1,7$ мВ/°С, т.е. на относительно высокие значения напряжения пробоя компенсирующего $p-n$ -перехода.

ТКН основного $p-n$ -перехода $\alpha U_{проб} \approx 1,7$ мВ/°С достигается при плотности тока порядка 25 А/см² (см. рисунок 3.4), что соответствует площади $p-n$ -перехода с

диаметром порядка 50 мкм. Обеспечение минимальных значений ТКН термокомпенсированного стабилитрона, требует оптимизации площади $p-n$ -перехода.

Таблица 4.2– Зависимость дифференциальных сопротивлений основного $p-n$ -перехода от площади $p-n$ -перехода

Конструкция		U_{cm} , В, при $I_{ст}$ 0,5 мА	r_{∂} , Ом, при $I_{ст}$ 0,5 мА	r_{∂} , Ом, при $I_{ст}$ 0,1 мА
ρ_v , Ом·см	\varnothing , мкм, осн. $p-n$ - перехода			
0,005	40	5,89...6,00	138...180	1520...1750
	100	5,70...5,83	410...490	2800...2950
0,008	40	6,13...6,29	90...130	700...890
	100	6,19...6,29	200...240	2100...2600

Экспериментальные данные подтверждают правомерность выбора минимальной площади основного $p-n$ -перехода: для обычно двух по току стабилизации тестируемых уровней дифференциальных сопротивлений основные $p-n$ -переходы с малой площадью отличаются заметным преимуществом как при относительно большом (0,5 мА), так и при малом (0,01 мА) токах стабилизации. Выявленная экспериментальным путём тенденция уменьшения дифференциального сопротивления обратной ветви ВАХ с уменьшением площади $p-n$ -перехода / увеличением плотности тока через $p-n$ -переход коррелирует с представлениями [2] об увеличении вероятности туннелирования носителей (f_T) при туннельном пробое на порядок – от величины 0,013 до 0,13. Соответствующие плотности токов: ~ 4 мА/см², ~ 30 мА/см².

Необходимое значение величины параметра “напряжение стабилизации” ($U_{ст.ном.}$) можно получить диффузией мышьяка на кремнии марки КДБ с различным удельным сопротивлением в разных режимах диффузии. Например, диффузией As

в кремний КДБ0,005; КДБ0,008; КДБ0,01 при температуре 1150°C в течение, соответственно, 0,5 ч., 1,0 ч., 4 ч., рисунок 4.6.

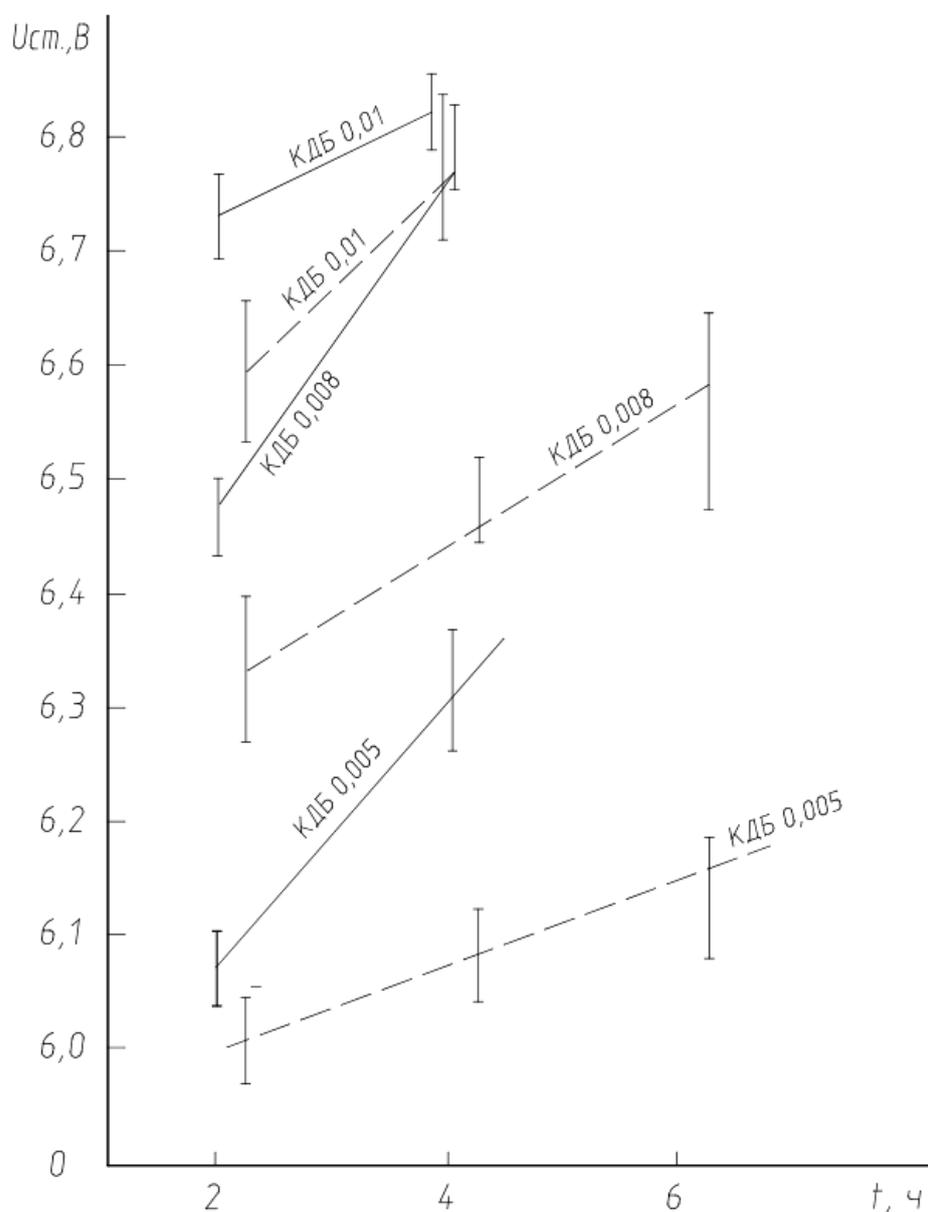


Рисунок 4.6 – Зависимость напряжения стабилизации ($U_{см.}$)

термокомпенсированного стабилитрона типа КС405А от времени диффузии мышьяка для разного удельного сопротивления и разных по площади основных p - n -переходов

Результаты, представленные на рисунке 4.5, также подтверждают вывод о целесообразности использования конструкции термокомпенсированного стабилитрона с напряжением стабилизации 6,2 В при токе 0,5 мА с основным p - n -

переходом диаметром 40 мкм: номинал с такими характеристиками проще сделать диффузией мышьяка в кремний КДБ0,005 в режиме диффузии при 1150°C в течение трёх с небольшим часов.

Для некоторой корректировки величины итогового значения температурного коэффициента напряжения стабилизации ТКС можно использовать параметр напряжение пробоя компенсирующего *p-n*-перехода ($U_{ст.комп}$), величина которого может быть повышена в определённых, но достаточно узких пределах за счёт увеличения температуры и времени диффузии фосфора при формировании компенсирующего *p-n*-перехода.

4.2.2 Конструкция и технология изготовления кристалла стабилитронов КС405А

На рисунке 4.7 приведена схема технологического маршрута изготовления кристаллов термокомпенсированных стабилитронов КС405А.

На первой стадии маршрута диффузией фосфора из газовой фазы формируются компенсирующий и охранный (к основному *p-n*-переходу) *p-n*-переходы. Далее проводится пассивация диэлектрической защиты (оксид кремния) слоем обладающего геттерирующими свойствами фосфоросиликатного стекла (ФСС); защита ФСС поликремнием (Si^*) и формирование диффузией мышьяка основного *p-n*-перехода. Омические контакты создаются напылением слоёв ванадия, серебра. Серебряные контактные выступы для сборки кристалла в стеклянном корпусе КД-2 “прижимной конструкции” формируются гальваническим способом.

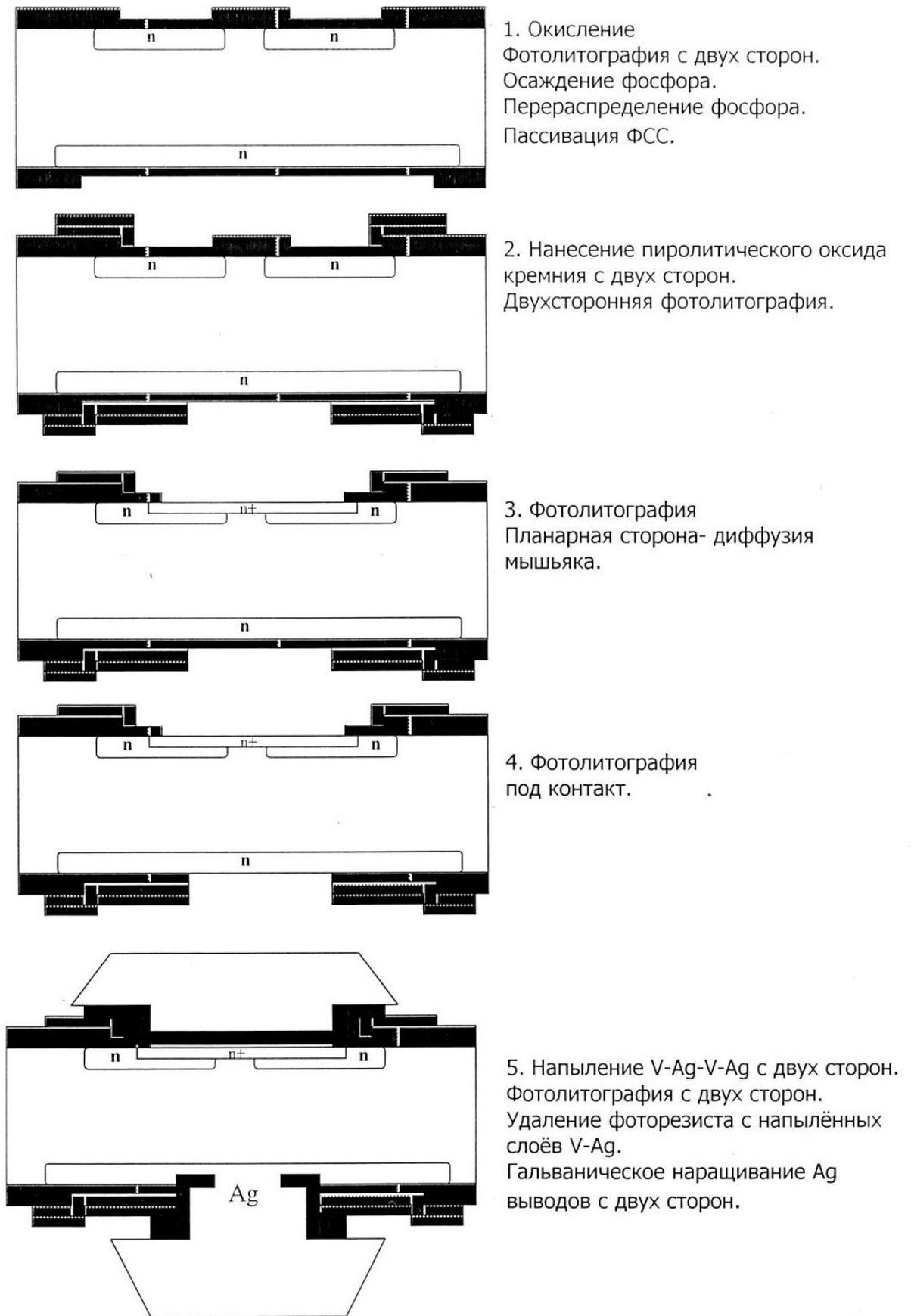


Рисунок 4.7 – Схема технологического маршрута изготовления кристалла термокомпенсированного стабилитрона КС405А

4.2.3 Сравнение стабилитронов КС405А с зарубежными аналогами – стабилитронами 1N4567

Проведено параллельное исследование основных функциональных параметров разработанных термокомпенсированных стабилитронов КС405А и их зарубежных аналогов – стабилитронов 1N4567, – и по данным из DATA SHEET [106], и фактическим, рисунок 4.8, таблица 4.3:

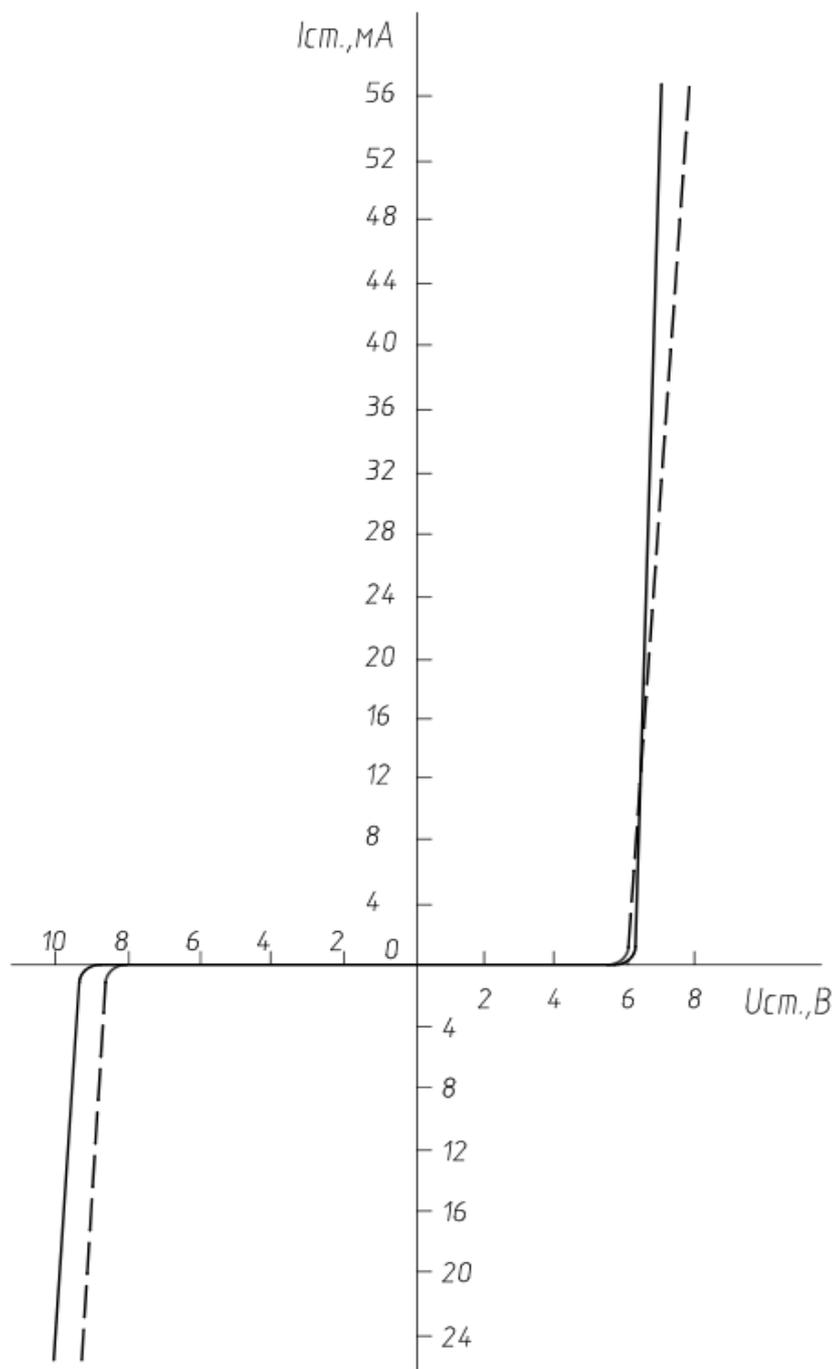


Рисунок 4.8 – ВАХ стабилитронов КС405А и 1N4567: — стабилитроны КС405А[111]; --- стабилитроны 1N4567 [106]

Таблица 4.3 – Основные электрические параметры стабилитронов КС405А [111] и 1N4567 [106]

Прибор	$U_{см}, В$	$I_{см}, мА$	$r_{д}, Ом,$ при $I_{ст}$ 0,5 мА	$r_{д}, Ом.$ при $I_{ст}$ 0,1 мА	Уход $U_{ст}, В$ в диапазоне температур (0 – 75)°С	$\alpha U_{см},$ %/°С
1N4567	$6,4 \pm 5\%$	0,5	200	–	0,010	0,002
Факт 1N4567	6,11÷6,185		81÷132	338÷482	–	0,001
КС405А	$6,2 \pm 5 \%$	0,5	200	–	0,010	0,002
Факт КС405А	6,13÷6,24		106÷130	300÷490	–	0,001

На рисунке 4.9 представлены результаты исследования устойчивости стабилитронов КС405А и 1N4567 [106] к перегрузке по току:

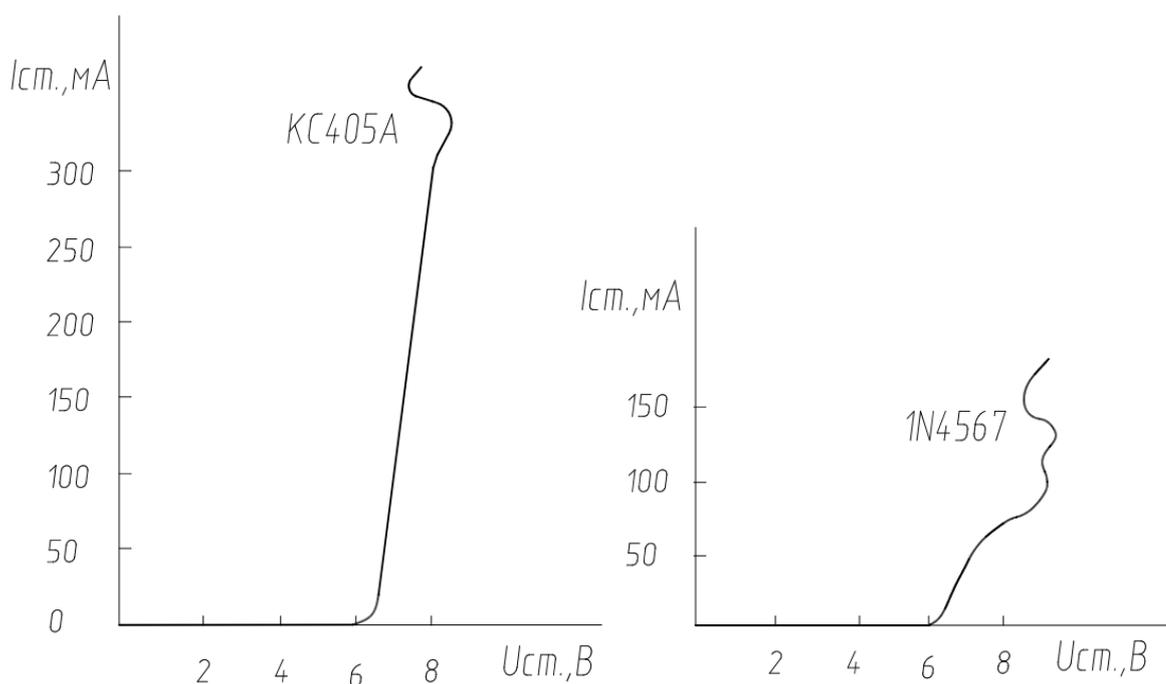


Рисунок 4.9 – Устойчивость стабилитронов КС405А и 1N4567 [106] к кратковременной перегрузке по току

Стабилитроны КС405А, 1N4567 изготавливаются в идентичных корпусах КД-2 (DO-35). В отличие от стабилитронов КС405А, изготавливаемых диффузией мышьяка (основной *p-n*-переход с диаметром 40 мкм) и фосфора (компенсирующий и охранный *p-n*-переходы), стабилитроны 1N4567 изготавливаются по технологии двухсторонней локальной эпитаксии. Диаметр основного *p-n*-перехода стабилитронов 1N4567 составляет ~ 8 мкм, чем, по-видимому, и объясняется различие стабилитронов КС405А и 1N4567 по устойчивости к перегрузке по току (энергетической устойчивости) – рисунок 4.9.

Различие номинального напряжения стабилизации стабилитронов 1N4567 (6,4 В) и фактического (~6,2 В), соответствующего номинальному напряжению стабилизации ТКС КС405А, можно объяснить только несоответствием исходных технических требований к разработке стабилитронов 1N4567 и результатов реальной разработки образцов стабилитронов 1N4567 зарубежным производителем (см. таблицу 4.3).

4.3 Разработка, исследование и производство прецизионных термокомпенсированных стабилитронов 2С198А ÷ 2С198К

На базе технологии изготовления стабилитронов КС405А общего применения разработана серия термокомпенсированных стабилитронов 2С198А ÷ 2С198К специального применения [114, 115]). Практически ТКС типа 2С198 получены в результате исследования и методом глубокого отбора из массива серийных термокомпенсированных стабилитронов КС405А общего применения (рисунок 4.10), дополнительных термотоковых тренировок и дополнительных технологических испытаний.

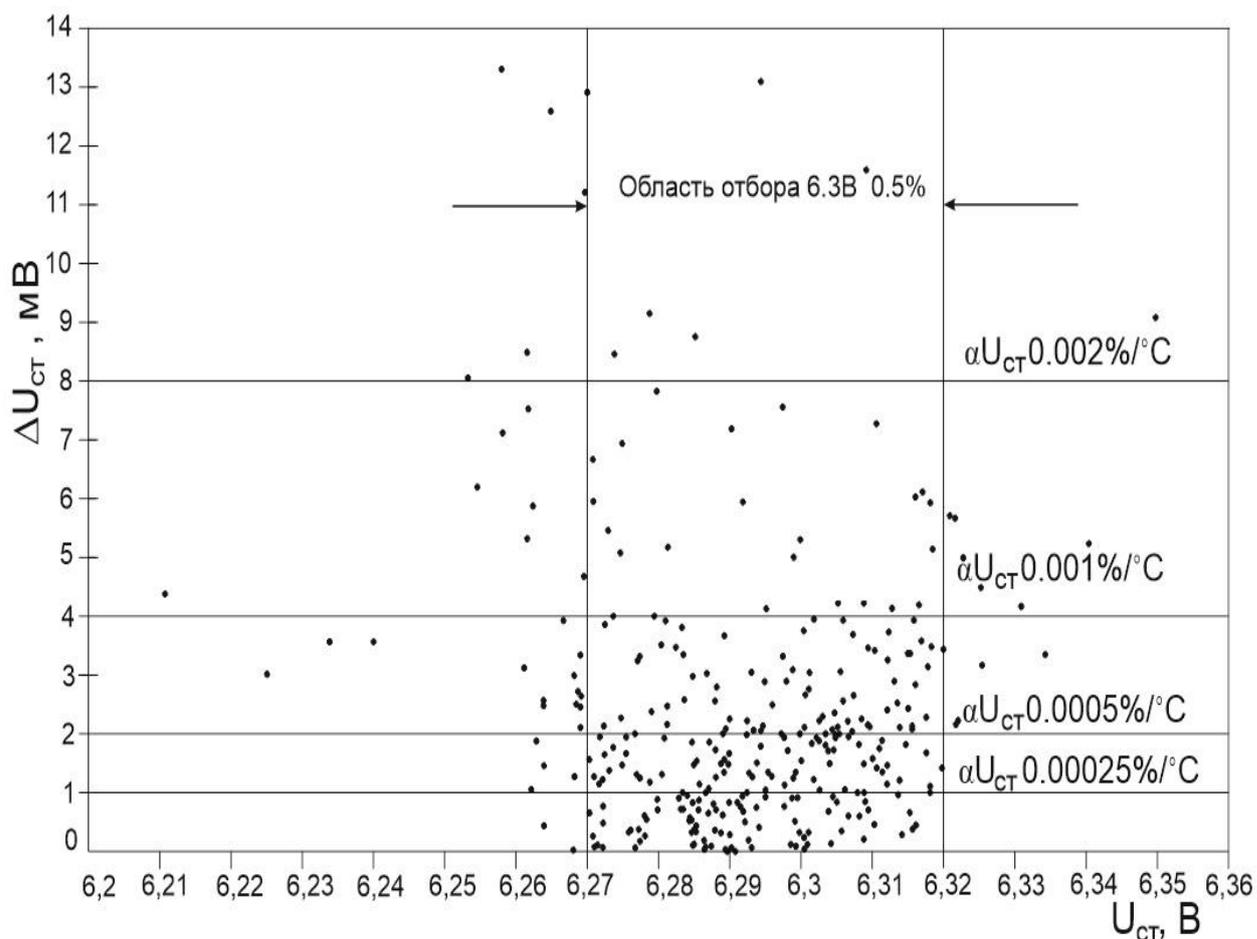


Рисунок 4.10 – Отбор термокомпенсированных стабилизаторов 2С198 из массива термокомпенсированных стабилизаторов КС405А по величине температурного коэффициента напряжения стабилизации в диапазоне температур минус 10°С ÷ + 65°С.

Стабилизаторы 2С198А ÷ 2С198К превосходят стабилизаторы КС405А, помимо обеспечения повышенных параметров надёжности, в функциональном плане: по ТКН (αU_{cm}), по долговременной стабильности (δU_{cm}), а также стабилизаторы 2С198 нормируются по напряжению низкочастотного шума (U_w), таблица 4.4.

Таблица 4.4 – Сравнение стабилизаторов 2С198А и КС405А

Параметр	Стабилитрон	
	КС405А	2С198А
U_{cm} , В	6.2	6.3
ΔU_{cm} , %	± 5	± 1
I_{cm} , мА	0.5	0.5
αU_{cm} , %/°С	0,002	0,0005
$U_{ш}$, мкВ	–	< 40
δU_{cm} , %, за 1000 ч.	0,05	0,002

Нужно отметить, что в технологии изготовления стабилитронов КС405, 2С198 используется описанный выше эффект трансформации мышьяка из пассивного состояния в активное. Для получения напряжения стабилизации в требуемом узком диапазоне $6,2 \text{ В} \pm 5 \%$ (норма), $6,3 \text{ В} \pm 1 \%$ (норма), обеспечивающем достижение “нулевой” точки компенсации, в технологические маршруты изготовления стабилитронов КС405, 2С198 введена операция НТ отжига как пластин с кристаллами, так и прибора в целом после герметизации кристалла в корпус, при температуре 500°C в течение $(1\div 3)$ ч. в зависимости от величины отклонения значения U_{cm} кристалла / прибора от нормы при $U_{cm} < N$.

Существенно более жёсткие параметры ТКС 2С198 относительно ТКС КС405А (класс точности по временной нестабильности $\delta U_{cm} \leq 0,002 \%$, разброс напряжения стабилизации $\Delta U_{cm} = 1 \%$, нормированное значение низкочастотного шума $U_{ш} \leq 40$ мкВ) позволяет отнести стабилитроны 2С198 к разряду прецизионных термокомпенсированных стабилитронов (ПТКС).

За период от разработки стабилитронов КС405А (1984 г.) до настоящего времени их выпуск составил порядка двух десятков млн. шт. За период от разработки (2006 г.) до настоящего времени выпуск стабилитронов 2С198А÷2С198К составил порядка 300 т. шт.

Выводы к главе 4

1. Приведён анализ принципа и условий термокомпенсации НВ стабилитронов с напряжением стабилизации на уровне $\sim 6,3 \text{ В}$

2. На основе литературных данных и собственных поисковых работ разработана феноменологическая методика и проведён расчёт конструкции НВ термокомпенсированного стабилитрона КС405А.

3. На основе результатов разработки и исследования метода высококонцентрационной диффузии As, разработки технологии получения планарных диффузионных низковольтных *p-n*-структур, разработки и исследования НВ диффузионных *p-n*-структур, разработана промышленная технология изготовления НВ термокомпенсированных стабилитронов КС405А, 2С198А÷2С198К.

4. Разработаны, исследованы и внедрены в серийное производство:

- термокомпенсированные стабилитроны общего применения КС405А с напряжением стабилизации 6,2 В при токе 0,5 мА;
- серия прецизионных термокомпенсированных стабилитронов специального применения 2С198А÷2С198К (9 типонаименований) с напряжением стабилизации 6,3 В при токе 0,5 мА.

5. Проведены сравнительные исследования основных функциональных параметров разработанных термокомпенсированных стабилитронов КС405А и их зарубежных аналогов – стабилитронов 1N4567. Установлено, что стабилитроны КС405А превосходят зарубежные аналоги – стабилитроны 1N4567 по уровню энергетической устойчивости.

ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ УЛЬТРА-ПРЕЦИЗИОННЫХ ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННЫХ СТАБИЛИТРОНОВ 2СП101А ÷ 2СП501Д

Прецизионные термокомпенсированные стабилитроны (ПТКС), устойчивые к воздействию таких дестабилизирующих факторов окружающей среды как температура и радиация, чрезвычайно востребованы в качестве прецизионного источника опорного напряжения в системах обработки информации, аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователях, устройствах дальней радионавигации и управления, калибраторах напряжения и тока, в высокоточной измерительной технике и, наконец, в командных приборах систем управления РТ и РКТ.

Радиационно-стойкие ультра-прецизионные, в том числе аттестуемые, термокомпенсированные стабилитроны (УАПС) 2СП101А ÷ 2СП501Д в металлостеклянном корпусе КД-4-1 разработаны на основе технологии высококонцентрационной диффузии As, созданной в настоящей диссертационной работе, в рамках ОКР «Вольт-И8» [110]:

- класса 0,01 – 2СП101Б, 2СП201Б, 2СП401Е, 2СП501Д;
- класса 0,005 – 2СП101А, 2СП201А, 2СП401Д, 2СП501Г;
- класса 0,001 – 2СП401Б, 2СП401Г, 2СП501А, 2СП501Б, 2СП501В;

и аттестуемые:

- класса 0,0005 – 2СП401А;
- класса 0,0003 – 2СП401В;
- класса 0,0002 – 2СП301А.

Требования к электрическим параметрам термокомпенсированных стабилитронов 2СП101А ÷ 2СП501Д представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Требования к электрическим параметрам ультра-прецизионных термокомпенсированных стабилизаторов 2СП101А ÷ 2СП501Д

№ п/п	Наименование	Номинальное значение напряжения стабилизации, $U_{ст.ном}$, В, при номинальном токе стабилизации $I_{ст.ном} = 7,5$ мА		Дифференциальное сопротивление, $r_{ст}$, Ом, при токе стабилизации $I_{ст}=7,5$ мА	Временная нестабильность напряжения стабилизации за 1000 ч, $\delta U_{ст}$, в диапазоне температур от 5 °С до 60 °С, измеренная при 45 °С		Температурный коэффициент напряжения стабилизации $\alpha U_{ст}$, ppm/°С, при температуре от 5 °С до 60 °С	Размах напряжения низкочастотных шумов, $U_{ш}$, мкВ, в диапазоне частот 0,01 – 1 Гц при температуре 25 ± 10 °С	Нелинейность температурной зависимости напряжения стабилизации, $\Delta U_{л}$, мкВ, в диапазоне температур от 5 °С до 60 °С
		не менее	не более		ppm	мкВ			
1	2СП101Б	5,98	6,22	12	± 100	± 600	± 20	10	± 500
2	2СП201Б	5,98	6,22	12	± 100	± 600	± 10	10	± 500
3	2СП401Е	5,98	6,22	12	± 100	± 600	± 2	10	± 350
4	2СП501Д	5,98	6,22	12	± 100	± 600	± 5	10	± 350
5	2СП101А	5,98	6,22	12	± 50	± 300	± 20	10	± 500
6	2СП201А	5,98	6,22	12	± 50	± 300	± 10	10	± 500
7	2СП401Д	5,98	6,22	12	± 50	± 300	± 2	10	± 350
8	2СП501Г	5,98	6,22	12	± 50	± 300	± 5	10	± 350
9	2СП401Б	5,98	6,22	12	± 10	± 60	± 2	2	± 350
10	2СП401Г	5,98	6,22	12	± 10	± 60	± 2	6	± 350
11	2СП501А	5,98	6,22	12	± 10	± 60	± 2	2	± 500
12	2СП501Б	5,98	6,22	12	± 10	± 60	± 5	2	± 500
13	2СП501В	5,98	6,22	12	± 10	± 60	± 5	6	± 350
14	2СП401А	5,98	6,22	12	± 5	± 30	± 2	2	± 250
15	2СП401В	5,98	6,22	12	± 3	± 18	± 2	2	± 250
16	2СП301А	5,98	6,22	12	± 2	± 12	± 2	2	± 250

Достигнутые основные характеристики промышленных прецизионных стабилитронов 2С108, 2С117 [126]: температурный коэффициент и нелинейность напряжения стабилизации, напряжение НЧ шума, долговременная стабильность – уже не удовлетворяют возросшим требованиям прецизионной РЭА Систем Управления РКТ нового поколения по обеспечению точностных характеристик и увеличению межкалибровочных интервалов прецизионных командных электронных приборов СУ РКТ и другой прецизионной РЭА всех видов базирования, а также прецизионных средств измерений и поверки, входящих в состав метрологического обеспечения оборонных сил РФ. В прецизионной РЭА высшей точности ультра-прецизионные стабилитроны применяются в качестве встроенной образцовой меры напряжения.

5.1 Феноменологическая методика расчёта конструкционных и технологических параметров ультра-прецизионных термокомпенсированных стабилитронов

Алгоритм расчёта конструкционно-технологических параметров прецизионных термокомпенсированных стабилитронов 2СП101А ÷ 2СП501Д класса вплоть до 2 *ppm* принципиально отличается от методики расчёта стабилитронов КС405А, 2С198А ÷ 2С198К, представленной выше. В частности, дополнительно вводится параметр – нелинейность температурной зависимости напряжения стабилизации ($\Delta U_{л.ст.}$).

Ниже приводится методика, основанная на экспериментальных данных, расчёта конструкции и технологии изготовления (технологических режимов) получения основного и компенсирующего р-п-переходов прецизионных термокомпенсированных стабилитронов [130].

Исходные значения основных электрических параметров ТКС: напряжение стабилизации $U_{ст.} = U_{проб.о.} + U_{пр.к.} = 6,2$ В при $I_{ст.} = 7,5$ мА; температурный коэффициент напряжения стабилизации $\alpha U_{ст.} = \alpha U_{проб.о.} + \alpha U_{пр.к.} \approx 0$ в диапазоне температур (5 ÷ 60)°С; нелинейность температурной зависимости $\alpha U_{ст.} \rightarrow \Delta U_{л.ст.} < 350$ мкВ.

Исходные технологические параметры: кристалл → кремний p -типа проводимости с $\rho_v = 0,005 \text{ Ом}\cdot\text{см}$; основной p - n -переход формируется диффузией мышьяка (As); компенсирующий и охранный p - n -переходы формируются диффузией фосфора (P).

На рисунке 5.1 представлена конструкция кристалла ТКС с $U_{cm} = 6,2 \text{ В}$, разработанного по технологии диффузии As [114]:

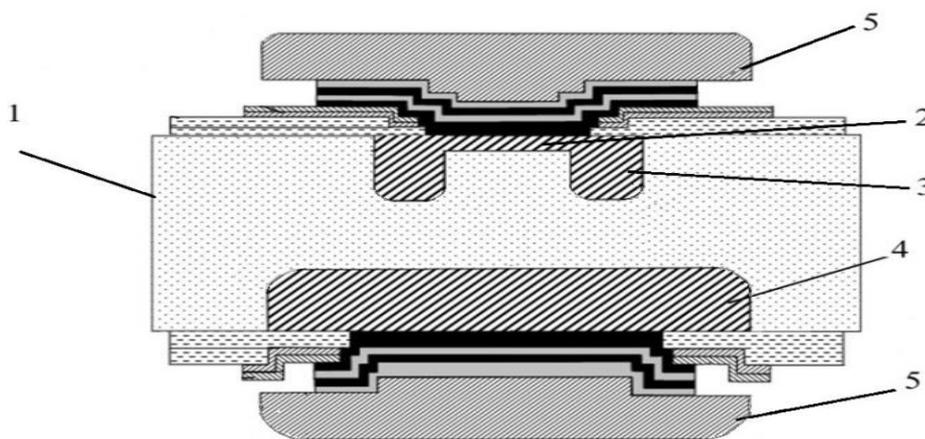


Рисунок 5.1 – Конструкция кристалла термокомпенсированного стабилитрона с $U_{cm} = 6,2 \text{ В}$: 1 – кремний КДБ0,005; 2 – основной p - n -переход; 3 – охранный p - n -переход; 4 – компенсирующий p - n -переход; 5 – контактные электроды

Определяются следующие электрические, конструкционные и технологические параметры: $U_{проб.о.}$, $U_{пр.к.}$, $S_{рп.о.}$, $S_{рп.к.}$, T_1 , t_1 , T_2 , t_2 , где $S_{рп.о.}$, $S_{рп.к.}$ – площади основного и компенсирующего p - n -переходов; T_1 , t_1 , T_2 , t_2 – температуры и времена диффузии фосфора и мышьяка при формировании на первом этапе технологии изготовления кристалла ТКС компенсирующего и охранныго p - n -переходов диффузией фосфора, на втором этапе – основного p - n -перехода диффузией мышьяка.

Один из алгоритмов расчёта конструкции ТКС, удовлетворяющий указанным выше исходным данным, можно получить на основе экспериментальных зависимостей ТКС $U_{проб.}$ основного p - n -перехода ($\alpha U_{проб.о.}$) и падения напряжения $U_{пр.}$ на компенсирующем p - n -переходе ($\alpha U_{пр.к.}$) в заданном диапазоне температур (5 – 60)°С от их напряжений пробоя ($U_{проб.о.}$, $U_{проб.к.}$) и соответствующих им плотностей токов ($J_{р-п.о.}$, $J_{р-п.к.}$), рисунки 5.2, 5.3 [130].

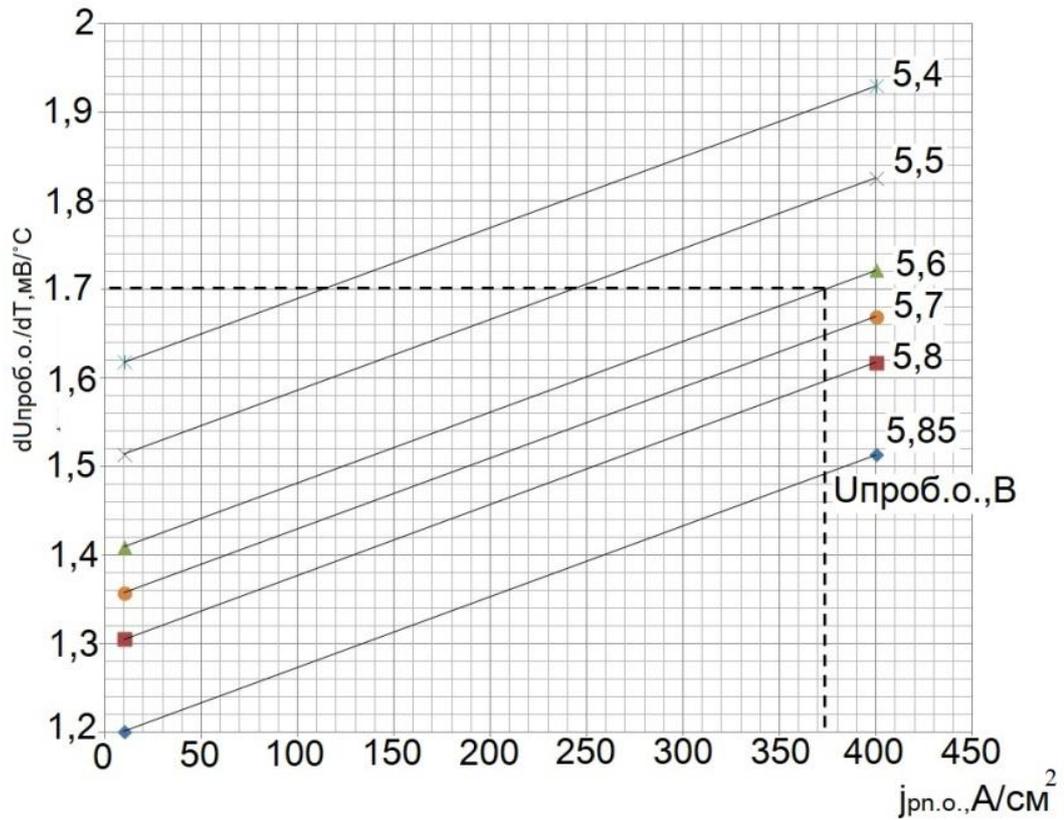


Рисунок 5.2 – Экспериментальные зависимости ТКН напряжения пробоя основного $p-n$ -перехода ($\alpha U_{проб.о.}$) от плотности тока ($J_{p-n.o.} = I_{ст.}/S_{p-n.o.}$) при разных значениях напряжения пробоя ($U_{проб.о.}$) для $I_{ст.} = 7,5$ мА

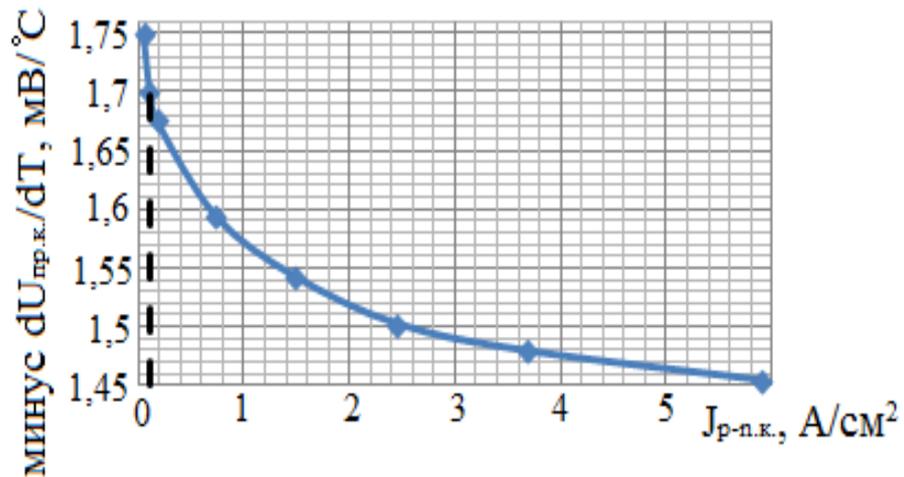


Рисунок 5.3 – Экспериментальная зависимость ТКН падения прямого напряжения на компенсирующем $p-n$ -переходе ($\alpha U_{пр.к.}$) от плотности тока ($J_{p-n.k.} = I_{ст.}/S_{p-n.k.}$) для $U_{проб.к} = 9$ В, $I_{ст.} = 7,5$ мА

Характер экспериментальной зависимости $dU_{np.k.}/dT(J_{p-n.k.})$, свидетельствующий о “насыщении” величины $dU_{np.k.}/dT$ на уровне минус 1,7 мВ при снижении плотности тока через компенсирующий $p-n$ -переход с $U_{npоб.к.} = 9$ В и $U_{np.k.} \approx 0,6$ В до значения $\leq 0,1$ А/см², позволяет воспользоваться этим значением $J_{p-n.k.}$ для определения конструкционных параметров компенсирующего $p-n$ -перехода: $J_{p-n.k.} \approx 0,1$ А/см²; $dU_{np.k.}/dT$ минус $\approx 1,7$ мВ/°С; $S_{p-n.k.} \approx 7,5 \cdot 10^{-2}$ см². Этой площади соответствует диаметр компенсирующего $p-n$ -перехода ~ 300 мкм.

Значению $dU_{np.k.}/dT$ минус $\approx 1,7$ мВ и равному ему значению $dU_{npоб.о.}/dT$ плюс $\approx 1,7$ мВ соответствует величина плотности тока через основной $p-n$ -переход ≈ 375 А/см² (рисунок 5.2), что определяет величину площади основного $p-n$ -перехода $S_{pн.о.} \approx 2 \cdot 10^{-5}$ см². Этой площади соответствует диаметр основного $p-n$ -перехода ~ 50 мкм.

Значения $U_{npоб}$ основного и компенсирующего $p-n$ -переходов ($U_{npоб.о.} = 5,6$ В, $U_{npоб.к.} = 9$ В) и величины их площадей ($S_{pн.о.} = 2 \cdot 10^{-5}$ см², $S_{p-n.k.} = 7,5 \cdot 10^{-2}$ см²) дают возможность рассчитать времена диффузии фосфора ($t_p \rightarrow t_1$) и мышьяка ($t_{As} \rightarrow t_2$) при заданных температурах диффузии для формирования основного и компенсирующего $p-n$ -переходов ТКС в кремнии p -типа проводимости с $\rho_v = 0,005$ Ом·см.

5.1.1 Нелинейность температурной зависимости напряжения стабилизации термокомпенсированного стабилитрона

Если такие параметры ТКС как $\alpha U_{cm.}(\alpha U_{npоб.о.}, \alpha U_{np.k.})$ можно достаточно определённо оценить, пользуясь известными теоретическими представлениями о зависимости от температуры и плотности тока $U_{npоб}$ обратносмещённого $p-n$ -перехода и U_{np} на прямосмещённом $p-n$ -переходе, то какая либо теория расчёта параметра $\Delta U_{л.см.}$ отсутствует.

На основании теоретических данных работы [131], в которой исследована нелинейность $\alpha U_{np.k.}$ компенсирующего $p-n$ -перехода ($\Delta U_{л.п.к.}$), а также сделан вывод о зависимости $\Delta U_{л.см.}$ от сопротивления растекания тока в базе основного $p-n$ -перехода, можно заключить, что вклад в нелинейность $\alpha U_{cm.}$ вносят как компенсирующий, так и основной $p-n$ -переходы.

По данным работы [132] одна из компонент прямого тока ($I_{np.}$) – инжекционная или рекомбинационная может преобладать в зависимости от конструкционно – технологических особенностей $p-n$ -перехода и, в первую очередь, от величины площади $p-n$ -перехода ($S_{p-n.np.}$), т.е. от плотности тока через $p-n$ -переход ($J_{p-n.np.}$).

Если превалирует инжекционная составляющая, нелинейность температурной зависимости падения прямого напряжения на прямосмещённом $p-n$ -переходе ($\Delta U_{л.np.}$) составляет (275÷345) мкВ. В случае преобладающей рекомбинационной компоненты $\Delta U_{л.np.}$ достигает (320÷500) мкВ. С учётом температурной зависимости ширины запрещённой зоны $p-n$ -перехода $E_g(T)$, $\Delta U_{л.np.}$ лежит в пределах (390÷615) мкВ. При возрастании плотности тока максимальное значение $\Delta U_{л.np.}$ соответствует расчётным данным для преобладающего рекомбинационного тока.

Для выполнения требования к величине нелинейности напряжения стабилизации ($\Delta U_{л.ст.} < 350$ мкВ для ТКС с $U_{ст.}$ 6,2 В при $I_{ст.}$ 7,5 мА) в диапазоне рабочих температур (+5 ÷ +60)°С, представлений о её зависимости от других электрических и конструкционных параметров ТКС, очевидно, не достаёт, поэтому для расчёта конструкции ТКС, обеспечивающей выполнение требования к $\Delta U_{л.ст.} < 350$ мкВ, приходится руководствоваться в основном экспериментальными данными. Целесообразно воспользоваться для этого выявленной нами впервые экспериментальной зависимостью $\Delta U_{л.ст.}$ от напряжения пробоя и плотности тока через основной $p-n$ -переход ТКС ($U_{проб.о.}$, $J_{p-n.o.}$), представленной на рисунке 5.4:

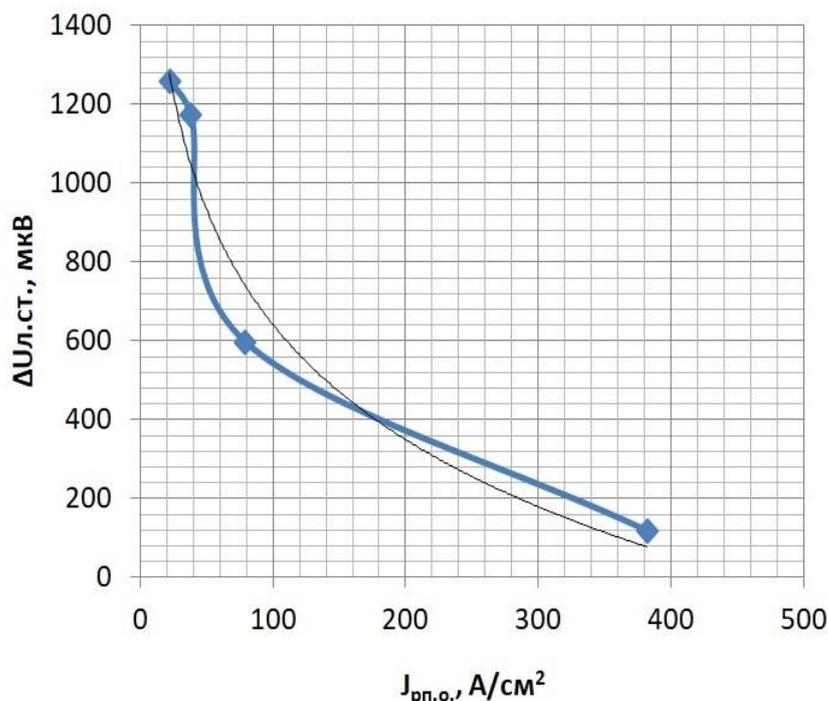


Рисунок 5.4 – Экспериментальная и аппроксимационная зависимости величины нелинейности $U_{ст}$ ($\Delta U_{л.ст.}$) термокомпенсированного стабилитрона, рассчитанного по приведённой выше методике, от плотности тока через основной $p-n$ -переход ($J_{p-n.o.}$) для $S_{p-n.o.} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$

Полученная зависимость соответствует теоретическим представлениям о роли сопротивления растекания в базе и необходимости повышения плотности тока через основной $p-n$ -переход за счёт снижения величины его площади ($S_{p-n.o.}$).

В целом, исследование нелинейности температурной зависимости температурного коэффициента напряжения стабилизации термокомпенсированных стабилитронов и, отдельно, – составляющих его $p-n$ -переходов может быть актуальной темой специальных исследований.

5.1.2 Алгоритм расчёта конструктивно – технологических параметров ультра-прецизионных термокомпенсированных стабилитронов

Таким образом, алгоритм определения конструктивно-технологических параметров прецизионных термокомпенсированных стабилитронов с требуемыми параметрами ($U_{ст.}$, $\alpha U_{ст.}$, $\Delta U_{л.ст.}$) при заданном токе стабилизации ($I_{ст.}$) складывается из следующей последовательности шагов [130]:

- для заданных значений нелинейности температурной зависимости напряжения стабилизации ($\Delta U_{л.см.}$) стабилитрона с заданным значением $I_{см.}$ по графику рисунка 5.4 определяется величина плотности тока через основной $p-n$ -переход ($J_{p-n.o.}$) и соответствующая площадь основного $p-n$ -перехода ($S_{p-n.o.} = I_{см.}/J_{p-n.o.}$). Для полученного значения $S_{p-n.o.}$ и значения напряжения пробоя $U_{проб.о.}$ рассчитываются необходимые технологические режимы формирования основного $p-n$ -перехода $\rightarrow T_2, t_2$;

- для найденной плотности тока через основной $p-n$ -переход ($J_{p-n.o.}$) и заданному значению $U_{см.}$ по графику рисунка 5.2 устанавливается значение температурного ухода напряжения пробоя основного $p-n$ -перехода $dU_{проб.о.}/dT$;

- для значения $dU_{пр.к.}/dT$, равного по модулю найденному значению $dU_{проб.о.}/dT$, по графику зависимости $dU_{пр.к.}/dT = f(U_{обр.к.}, J_{p-n.к.})$ (рисунок 5.3) определяются плотность тока ($J_{p-n.к.}$) и напряжение пробоя ($U_{обр.к.}$) компенсирующего $p-n$ -перехода. По полученной величине плотности тока $J_{p-n.к.}$ определяется площадь компенсирующего $p-n$ -перехода ($S_{p-n.к.} = I_{см.}/J_{p-n.к.}$). По величинам $U_{обр.к.}$ и $S_{p-n.к.}$ задаются необходимые технологические режимы формирования компенсирующего $p-n$ -перехода: T_1 °C, t_1 ч.

Таким образом, экспериментальные зависимости $\Delta U_{л.см.}(I_{см.}, J_{см.})$, $dU_{см.}/dT(U_{проб.о.}, J_{см.})$, $dU_{пр.к.}/dT(U_{проб.к.}, J_{p-n.к.})$, рисунки 5.2 ÷ 5.4, дают возможность для заданных электрических параметров $U_{см.}$, $I_{см.}$, $\alpha U_{см.}$, $\Delta U_{л.см.}$ найти значения конструкционно - технологических параметров ТКС: $S_{p-n.к.}$, $S_{p-n.o.}$, T_1 , t_1 , T_2 , t_2 .

5.2 Разработка и исследование ультра-прецизионных

термокомпенсированных стабилитронов класса точности 0,0002%

На базе результатов разработки на основе технологии высококонцентрационной диффузии As термокомпенсированных стабилитронов КС405А и 2С198(А-К) в стеклянном корпусе КД-2 и разработанной методики расчёта прецизионных стабилитронов разработаны ультра-прецизионные термокомпенсированные стабилитроны (УПТС) классов точности вплоть до 0,0002% типов 2СП101А ÷ 2СП501Д (16 типономиналов), в т.ч. аттестуемые –

2СП401А, 2СП401В, 2СП301А (УАПС), в стеклянном корпусе КД-4-1 с $U_{см}$ 6.1В $\pm 2\%$ при токе 7.5 мА, $\alpha U_{см}$ до 0,0002 %/°С (2 ppm), $U_{ш}$ до 2 мкВ в полосе частот (0,001÷1) Гц, $\delta U_{см}$ за 1000 ч. – до 0,0002% (2 ppm) и $\Delta U_{л.см.} < 100$ мкВ, рисунок 5.5.

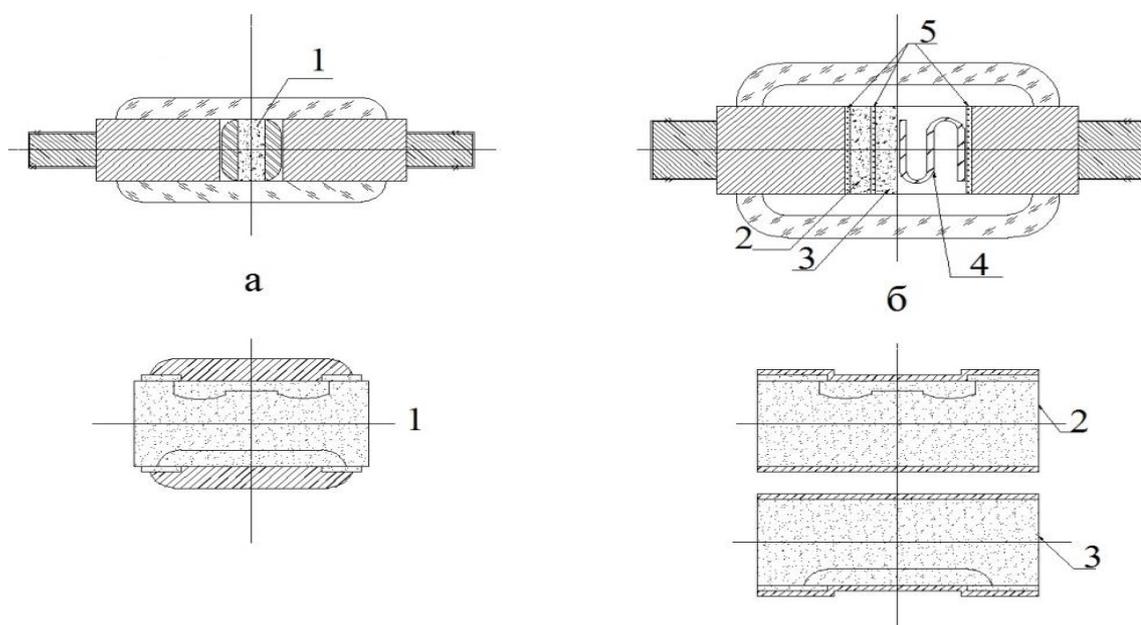


Рисунок 5.5 – Конструкции ТКС в корпусах КД-2 (а) и КД-4-1 (б): 1 – кристалл ($n^+ - p^+ - n^+$ -структура) ТКС КС405А, 2С198А÷2С198К; 2, 3 – основная и компенсирующая $p-n$ -структуры УАПС 2СП101А÷2СП501Д; 4 – S-образный компенсатор; 5 – спаи

На рисунке 5.6 (фото) представлены образцы термокомпенсированных стабилитронов КС405А, 2С198А-2С198К в стеклянном корпусе КД-2 и 2СП101А÷2СП501Д в стеклянном корпусе КД-4-1:

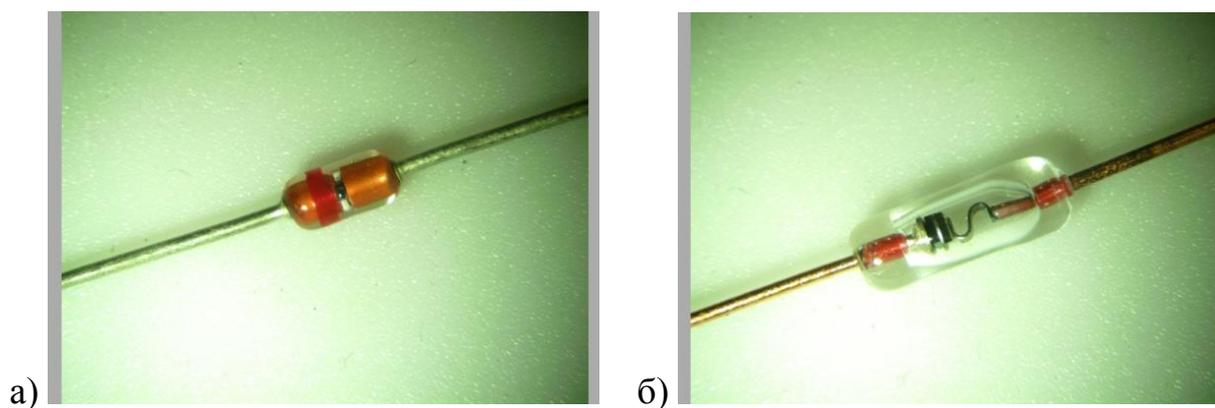


Рисунок 5.6 – Фото образцов термокомпенсированных стабилитронов в корпусах КД-2 и КД-4-1: а) КД-2 – однокристалльные КС405А, 2С198А÷2С198К; б) КД-4-1 – двухкристалльные радиационно-стойкие термокомпенсированные стабилитроны 2СП301А÷2СП501Д

Конструкция стабилитронов 2СП101А÷2СП501Д в корпусе КД-4-1 лишена одного из принципиальных недостатков, присущих стабилитронам КС405А, 2С198 в корпусе КД-2: оба внутренних контакта в конструкции стабилитронов КС405А, 2С198 – с жёстким прижимным контактированием, что, очевидно, не лучшим образом отражается на долговременной стабильности прецизионных стабилитронов. Напротив – один из внутренних контактов стабилитронов 2СП301А÷2СП501Д в корпусе КД-4-1 – паяный, второй – прижимной, но посредством пружинистого S – образного компенсатора. Также размеры корпуса КД-4-1 позволили разместить кристалл большей площади, чем в корпусе КД-2, а именно (0,95 x 0,95) мм², что предоставляет большие возможности, в частности, для задания определённой плотности тока через компенсирующий *p-n*-переход, т.е. управления параметром температурный коэффициент напряжения стабилизации ($\alpha U_{проб.}$).

В конструкции стабилитронов 2СП101А÷2СП501Д основной и компенсирующий *p-n*-переходы размещены в отдельных кристаллах (Рисунок 5.5, поз. 2,3), что связано с решением задачи обеспечения повышенной радиационной стойкости (РС) стабилитрона за счёт дополнительного легирования кристалла с компенсирующим *p-n*-переходом золотом. В сравнении с однокристалльным ТКС типа 2С198, радиационная стойкость УАПС 2СП301А÷2СП501Д по критерию “уход U_{cm} при воздействии предельно допустимого флюенса радиации” уменьшена с 70 до 1,5 мВ, о чём более подробно будет сказано ниже.

Ультрапрецизионность УАПС обеспечивается, помимо использования метода глубокого отбора, также технологией НТ отжига пластин с кристаллами основных *p-n*-переходов. Прецизионная корректировка величины напряжения пробоя основного *p-n*-перехода позволяет достичь величины $dU_{проб.о.}/dT$ предельно приближенной по модулю к величине $dU_{проб.к.}/dT$ компенсирующего *p-n*-перехода, т.е. обеспечить значение величины температурного коэффициента напряжения стабилизации УАПС на уровне 1 ppm.

Сравнение основных параметров ТКС типов КС405А, 2С198А, 2СП301А приведено в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Сравнение основных параметров термокомпенсированных стабилитронов типов КС405А, 2С198А, 2СП301А

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

Чтобы обеспечить минимальный / “прецизионный” разброс величины напряжения стабилизации, технологии изготовления термокомпенсированных стабилитронов включают операцию тонкой корректировки параметра U_{cm} НТ отжигом при температуре 500°С. Особенно это важно для стабилитронов серии 2С198А÷2С198К и серии 2СП101А÷2СП501Д.

5.2.1 Стойкость прецизионных термокомпенсированных стабилитронов к воздействию внешних факторов

Одно из важнейших требований к полупроводниковым компонентам специального назначения – радиационная стойкость (РС), т.е. способность сохранять (быстро восстанавливать) основные функциональные характеристики при воздействии значительных доз проникающей радиации различного рода: гамма, протонов, электронов, нейтронов. И особенно это важно при использовании таких компонент в системах управления ракетными и ракетно-космическими комплексами с высокими тактико-техническими характеристиками по точности попадания, точности выведения и длительности работоспособности в условиях излучений ядерного взрыва и космического пространства.

Для низковольтных термокомпенсированных стабилитронов (НВ ТКС) с основными параметрами – напряжением стабилизации ~6,3В и температурным коэффициентом напряжения стабилизации не более 0,0005 %/°С, представляющих один из объектов разработки и исследований настоящей работы, наиболее

критичны с точки зрения РС – гамма и нейтронные ионизирующие излучения (γ -излучение, n^0 -излучение).

Уход напряжения стабилизации описанных выше НВ ТКС типа 2С198 при воздействии предельно допустимого флюенса быстрых нейтронов (F_n) $\sim 10^{15}$ рад достигает ~ 70 мВ. Допустимый радиационный уход напряжения стабилизации ТКС типа УАПС, применяемых в электронных системах, работающих в условиях, в частности, космоса, – не более нескольких мВ.

Следствием воздействия ионизирующих излучений на полупроводник могут быть изменения его структурных и электрофизических параметров – ионизация и смещение атомов решётки, уменьшение времени жизни неосновных носителей, изменение величины эффективной концентрации типозадающей примеси в базе диода [128].

Нейтронное излучение – причина устойчивых радиационных дефектов, обусловленных необратимыми физико-химическими изменениями структуры кремния: смещение атомов, образование примесей других элементов, образование радиоактивных изотопов, в некоторой степени – ионизация атомов основных легирующих примесей.

Воздействие гамма излучения также носит объемный характер. Под влиянием гамма - излучения возникают ионизация, явление фотопроводимости, повышение температуры, изменение анизотропных свойств кристаллических веществ. Однако все эти эффекты в случае НВ диодных (стабилитронных) p - n -структур носят обратимый характер, т.е. практически исчезают с прекращением облучения.

Для низковольтных p - n -переходов с напряжением пробоя менее 7 В с туннельным и смешанным механизмами пробоя, изготавливаемых на предельно легированном кремнии с удельным сопротивлением $\sim 0,001 \dots 0,005$ Ом·см ($N_0 > 10^{19}$ см $^{-3}$), эффект изменения концентрации типозадающей примеси в базе при воздействии ионизирующих излучений не актуален. Напряжение стабилизации (U_{cm}) низковольтных стабилитронов практически не чувствительно к действию предельно высоких доз нейтронов. Аналогичным образом оценивается влияние на

U_{cm} низковольтных стабилитронов изменения величины подвижности неосновных носителей в сильно легированном кремнии. Именно поэтому НВС, можно сказать – по определению, отличаются высокой радиационной стойкостью.

Для p - n -переходов, изготавливаемых на сильно легированном кремнии, т.е. с высокой концентрацией типозадающей примеси в базе, основной радиационно чувствительный параметр – падение прямого напряжения (U_{np}).

Падение напряжения на прямосмещённом p - n -переходе (U_{np}) можно представить следующим образом:

$$U_{np} = U_{p-n} + U_{\delta} + U_{\kappa}, \quad (5.1)$$

где U_{δ} – падение напряжения на базе:

$$U_{\delta} = I_{\delta} \cdot \rho_{v\delta} \cdot \frac{W_{\delta}}{S_{p-n}}, \quad (5.2)$$

где I_{δ} – ток стабилизации; ρ_v – удельное сопротивление базы; W_{δ} – толщина базы; S_{p-n} – площадь p - n -перехода; U_{κ} – падение напряжения на омических контактах.

Так как сопротивление омических контактов обычно обеспечивается на уровне не более 10^{-5} Ом·см² и речь идёт о стабилитронах, работающих в области миллиамперных токов стабилизации, можно считать, что предполагаемое изменение падения напряжения на омических контактах при действии ионизирующих излучений пренебрежимо мало: $\Delta U_{\kappa}(F_n) \rightarrow 0$.

Вследствие $\Delta \rho_v(F_n) \rightarrow 0$ для сильно легированной базы НВ стабилитрона (в нашем случае – кремний КДБ0,005, $N_{\delta} = 10^{20}$ см⁻³), изменение падения напряжения на базе также не существенно: $\Delta U_{\delta}(F_n) \rightarrow 0$.

Прямая ветвь ВАХ реального p - n -перехода в области малых токов описывается следующей формулой [55]:

$$I_{np} = q \cdot S_{p-n} \cdot (x_1 + x_2) \frac{U_{np} - I_{np} \cdot r_{\delta}}{\varphi - U} \cdot \frac{n_i}{\tau} \cdot e^{U_{np}/2\varphi\tau}, \quad (5.3)$$

где U_{np} – падение напряжения на прямо смещённом p - n -переходе; I_{np} – прямой ток; S_{p-n} – площадь p - n -перехода; r_{δ} – сопротивление базы; n_i – концентрация свободных носителей заряда в собственном полупроводнике; $(x_1 + x_2)$ – ширина обеднённых слоев p - n -перехода; τ – время жизни основных носителей заряда.

На рисунке 5.7 [132] представлено изменение прямой ветви ВАХ диода в результате воздействия радиации. При малых токах происходит уменьшение величины U_{np} , при больших – значительное увеличение. В области малых токов это объясняется значительным уменьшением времени жизни (τ) основных носителей заряда. При больших токах уменьшение наклона ВАХ диода объясняется увеличением сопротивления базы (r_b).

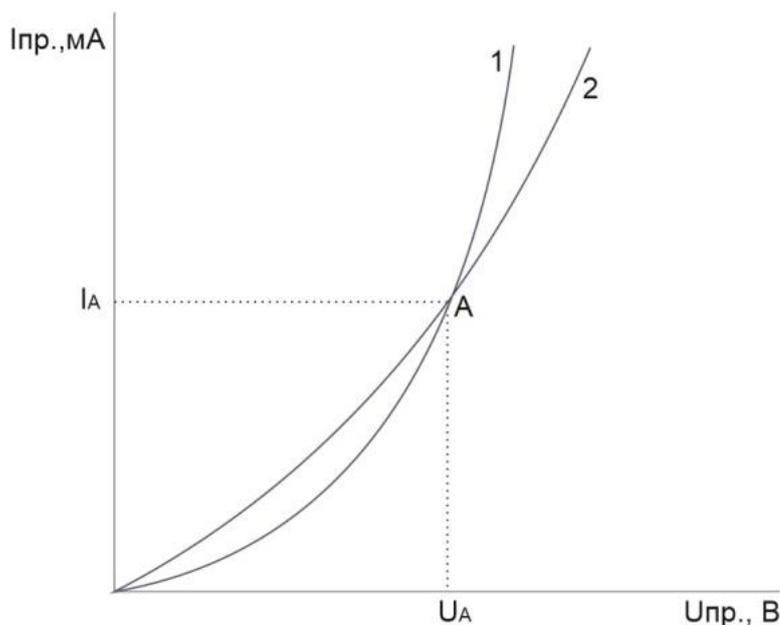


Рисунок 5.7 – Изменение прямой ветви ВАХ диода в результате воздействия радиации: 1 – до и 2 – после облучения. Точка А – переход от “малых” к “большим” токам [132]

Отсюда следует, что повышение радиационной стойкости ТКС, работающих на малых токах стабилизации, должно идти по механизму уменьшения величины U_{np} компенсирующего p - n -перехода.

Для повышения РС полупроводниковых приборов (ППП) практикуются технологии радиационных технологических процессов (РТП) – облучение кристаллов ППП различными высокоэнергетичными излучениями: гамма, протонами, электронами, альфа, – следствием воздействия которых является уменьшение времени жизни неосновных носителей заряда. Облучение с этой целью нейтронами неприемлемо вследствие продолжительного эффекта

наведённой радиоактивности. В то же время, эффект повышения РС *p-n*-структур вследствие технологического воздействия на них каких либо излучений может “отжигаться” полностью или частично с течением времени, тем более, если этому способствует температура.

Эффективным и легко управляемым способом снижения времени жизни неосновных носителей служит диффузионное легирование *p-n*-структур тяжёлыми металлами, энергетические уровни которых находятся в области пространственного заряда. Обычно, в технологии быстродействующих диодов, для этой цели применяется золото. Таким же образом снижают уровни НЧ шума стабилитронов, работающих в режиме малых токов стабилизации.

Исследование стойкости термокомпенсированных с напряжением стабилизации 6,1 В при токе 7,5 мА к гамма излучению свидетельствует о том, что для ТКС с αU_{cm} менее 5 ppm, практически не чувствующих разницу температур окружающей среды между первым и последним измерениями, изменение U_{cm} ТКС при воздействии высоких доз γ -излучения находится в пределах погрешности измерений, таблица 5.3:

Таблица 5.3 – Экспериментальные данные по воздействию гамма излучения на термокомпенсированный стабилитрон

№ п/п	U_{cm} , В, до воздействия	αU_{cm} , ppm	U_{cm} , В, после воздействия	ΔU_{cm} , мкВ	Величина γ - воздействия, Мрад
1	6,1183500	5	6,1183216	134	70
2	6,1165467	2	6,1165462	5	
3	6,1185502	6	6,1185462	40	30
4	6,1139225	4	6,1139332	минус 107	
5	6,1124487	4	6,1124379	108	

Испытания на стойкость НВ однокристалльных ТКС типа 2С198 к воздействию гамма-нейтронного излучения выявили уход их напряжения

стабилизации при достижении предельно допустимого флюенса радиации $\Delta U_{cm}(F_{\gamma n})$ – порядка 70 мВ, рисунок 5.8:

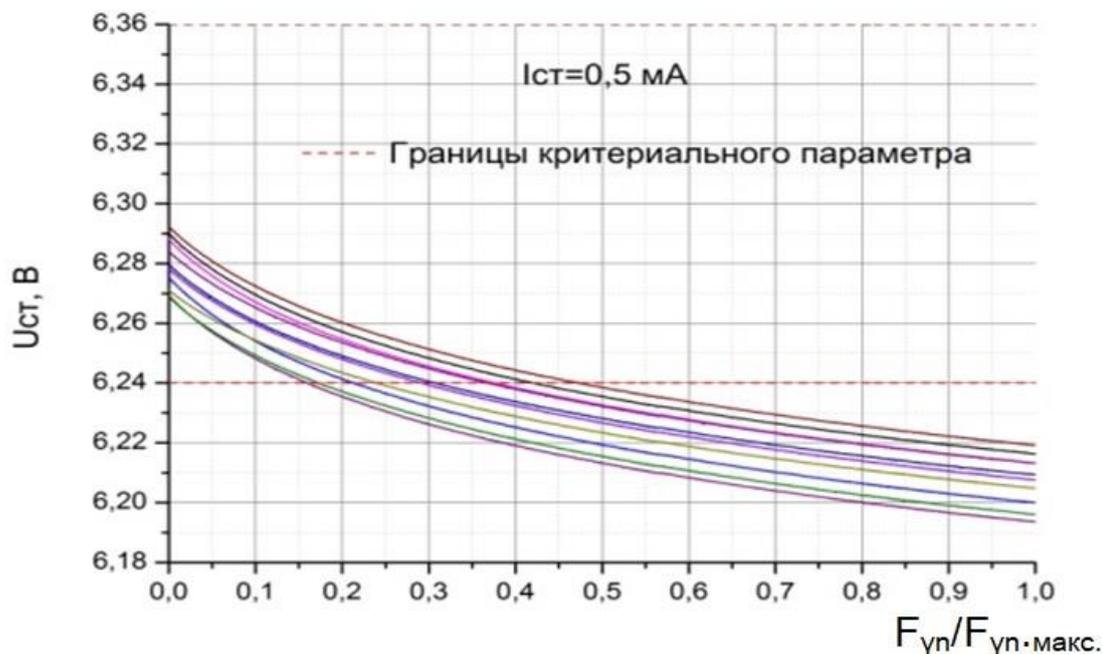


Рисунок 5.8 – Радиационный уход напряжения стабилизации низковольтного термокомпенсированного стабилитрона

Т.к. в конструкции ТКС присутствуют два *p-n*-перехода – основной и компенсирующий, необходимо было выяснить реакцию на воздействие ионизирующих излучений каждого из них в отдельности и найти способ повышения их радиационной стойкости. С этой целью были изготовлены образцы диодов на основе кристаллов отдельно с основным и компенсирующим *p-n*-переходами, идентичными тем, что входят в конструкцию однокристалльного НВ ТКС.

Радиационный уход напряжения стабилизации образцов с основным *p-n*-переходом, испытанных с источником гамма-нейтронного излучения, практически не ощутим: $\Delta U_{cm.o.}(F_{\gamma n}) \rightarrow 0$, рисунок 5.9:

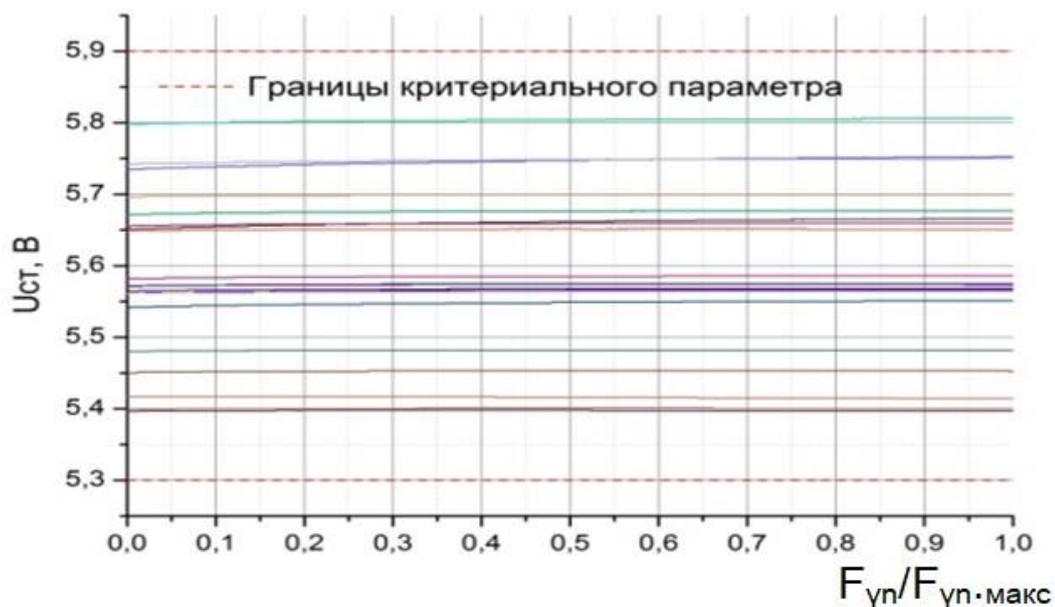


Рисунок 5.9 – Радиационный уход напряжения стабилизации образцов диодов, изготовленных на основе кристаллов кремния с “основным p - n -переходом”

В то же время радиационный уход прямого напряжения компенсирующего p - n -перехода $\Delta U_{пр.к.}(F_{\gamma п})$ составил ~ 70 мВ, т.е. соответствует уходу напряжения стабилизации ($U_{ст}$) однокристалльного термокомпенсированного стабилитрона (см. рисунок 5.8).

Т.о. подтверждается положение об ответственности за радиационную стойкость (РС) НВ ТКС изменения прямого напряжения на компенсирующем p - n -переходе вследствие изменения времени жизни (τ_B) неосновных носителей заряда в базе диода.

Т.е. задача повышения радиационной стойкости ТКС сводилась к повышению РС компенсирующего p - n -перехода. Акцент был сделан на способе повышения РС ТКС диффузионным легированием кристаллов ТКС золотом [127].

На первом этапе легирование золотом проводилось в пластины однокристалльных НВ ТКС. Диффузия золота привела к существенному изменению вольт-амперной характеристики однокристалльных НВ ТКС, а именно – к смягчению обратной ветви ВАХ.

Количественно это выражается в увеличении дифференциального сопротивления (r_d) обратной (рабочей) ветви ВАХ p - n -перехода: в частности, величина r_d при токе 0,5 мА возросла со значения ~ 70 Ом до значения ~ 400 Ом,

что вполне ожидаемо и объясняется увеличением тока насыщения p - n -перехода (I_s) при снижении времени жизни неосновных носителей заряда вследствие введения диффузией в p - n -переход золота значительного количества генерационно – рекомбинационных центров.

Вследствие чрезвычайно высокого коэффициента диффузии золота в кремнии, относительно других легирующих примесей, локальное его введение – только в область компенсирующего p - n -перехода в случае однокристалльной конструкции ТКС пока не представляется возможным. Т.о., чтобы сохранить ВАХ основного p - n -перехода, приходим к необходимости создания технологии целенаправленного легирования золотом только компенсирующего p - n -перехода.

В результате, однокристалльная конструкция НВ ТКС преобразована в двухкристалльную: кристалл с основным и кристалл с компенсирующим p - n -переходами. В технологический маршрут изготовления кристаллов с компенсирующим p - n -переходом включён процесс легирования золотом. Следствием легирования кристалла с компенсирующим p - n -переходом золотом было снижение его $U_{пр.к.}$ от начального значения $\sim 0,65$ В до значения $\sim 0,5$ В, что подтверждает положения, представленные в [128], о зависимости прямого падения напряжения от времени жизни носителей заряда.

В результате радиационная составляющая уходя падения прямого напряжения образцов диодов, изготовленных на основе кристаллов с компенсирующим p - n -переходом, легированных золотом, при испытаниях диодов на стойкость к воздействию как гамма-излучения, так и гамма-нейтронного излучения составила менее 3,0 мВ.

Фактически то же заключение можно сделать относительно низковольтных термокомпенсированных стабилитронов в целом, т.е. НВ ТКС в двухкристалльном исполнении – с кристаллом основного p - n -перехода и с кристаллом компенсирующего p - n -перехода, легированном золотом.

На рисунках 5.10, 5.11 представлены результаты исследования на радиационную стойкость образцов двухкристалльных УАПС типа 2СП301А в корпусе КД-4-1, изготовленных по технологии с легированием кристалла с

компенсирующим p - n -переходом золотом и серийных однокристалльных ПТКС типа 2С198Е, изготавливаемых по типовой технологии в корпусе КД-2 [133]:

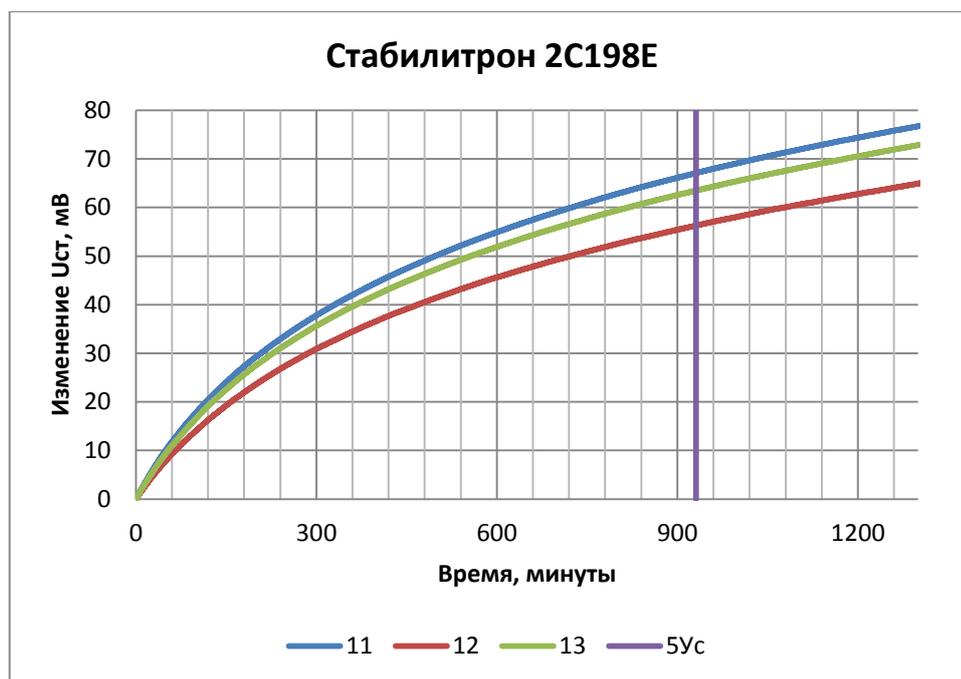


Рисунок 5.10 – Радиационный уход напряжения стабилизации образцов однокристалльных прецизионных термокомпенсированных стабилизаторов типа 2С198Е

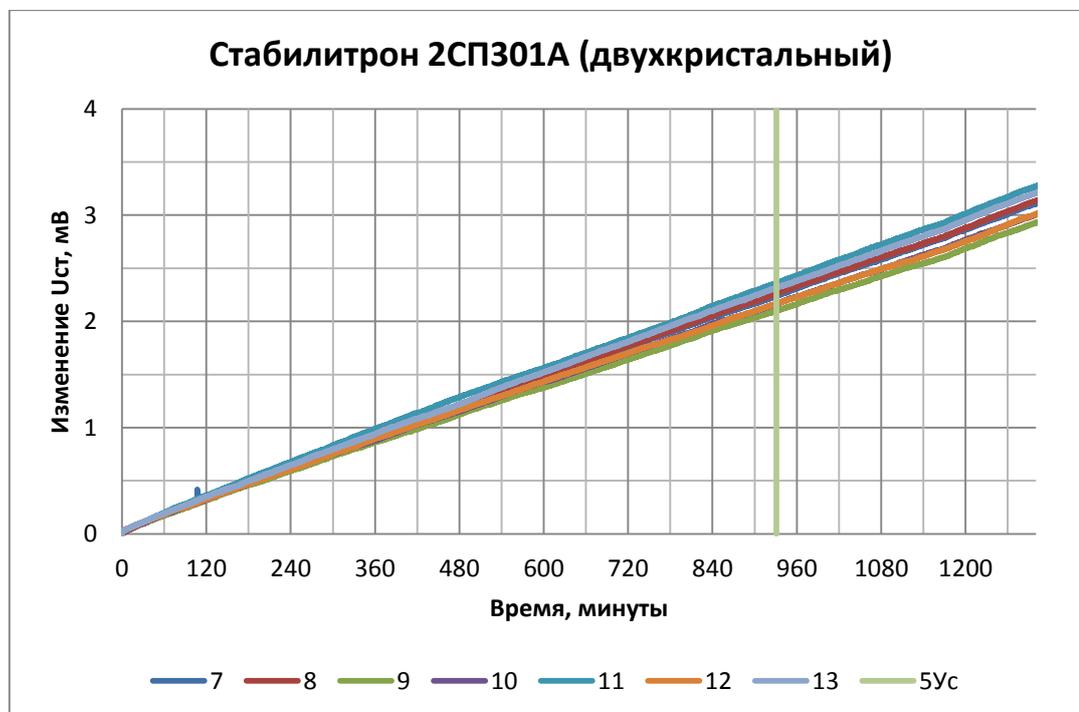


Рисунок 5.11 – Радиационный уход напряжения стабилизации образцов двухкристалльных ультра-прецизионных аттестуемых термокомпенсированных стабилизаторов (УАПС) типа 2СП301А

Показательно соотношение радиационных уходов напряжения стабилизации образцов 2СП301А и 2С198Е при воздействии предельного потока быстрых нейтронов ($6Ус$): 3 мВ и 70 мВ соответственно. Таким образом, эффективное повышение радиационной стойкости низковольтных термокомпенсированных стабилитронов достигается только для двухкристальной конструкции стабилитронов за счёт легирования золотом кристалла с компенсирующим *p-n*-переходом.

Проведено также исследование возможности повышения РС ТКС одним из способов радиационных технологических процессов (РТП) – воздействием на кристаллы ППП высокоэнергетичным излучением α -частицами.

Исследование РС кристалла с компенсирующим *p-n*-переходом, легированного золотом и подвергнутого радиационному воздействию α -частиц (Радиевый институт имени В.Г. Хлопина, г.СПб) не дало какого либо улучшения результатов сравнительно с данными по исследованию РС кристаллов только с легированием золотом. Так как результат применения технологии диффузии золота был достаточен для цели обеспечения стойкости ТКС к СВВФ, в маршрут изготовления УАПС включён только технологический процесс диффузии золота в кристалл с компенсирующим *p-n*-переходом.

5.2.2 Метрологическое обеспечение разработки, производства и испытания ультра-прецизионных термокомпенсированных стабилитронов

Ультра-прецизионный характер величин основных параметров УАПС требует предельно высокого уровня метрологического обеспечения исследований, производственных измерений, аттестации и испытаний.

Наиболее сложным и трудоёмким параметром для измерения УАПС является параметр временная нестабильность напряжения стабилизации ($\delta U_{ст}$). Для термокомпенсированных стабилитронов класса 0,0001 требуется многостадийная система отбора, чтобы максимально снизить количество стабилитронов – кандидатов на этапе проверки их метрологических характеристик с наивысшей точностью.

Согласно ГОСТ 18986.21, погрешность измерения δU_{cm} класса 0,001 и выше должна быть не более $\pm 30\%$ с доверительной вероятностью 0,95. Из этого следует, что на заключительном этапе аттестации измерение напряжения стабилизации (δU_{cm}) необходимо обеспечить с погрешностью не более $\pm 3,5$ мкВ или $\pm 0,00005\%$ ($\pm 0,5$ ppm).

В эту погрешность входят: погрешность непосредственно средства измерения, погрешность за счёт задания и поддержания тока стабилизации, включая точность его контроля, погрешность за счёт задания и поддержания температуры в измерительной камере, термо-ЭДС и др.

Таким образом, класс точности средства измерения (система “источник опорного напряжения – измерительный прибор”) должен быть выше, чем $0,5$ ppm за всё время измерения $\delta U_{ст}$, т.е. за 1000 ч. Измерение δU_{cm} предполагает использование только дифференциального метода измерений.

Первые экспериментальные образцы УАПС, рассчитанные и изготовленные в соответствии с приведённой выше методикой, были исследованы в Головной организации Госстандарта – ФГУП «ВНИИМС» [134].

Измерения параметра U_{cm} проводились с помощью мультиметра Agilent 3458A, микровольтметра Agilent 34420A, калибруемых непосредственно по Государственному вторичному эталону единицы напряжения ГВЭТ 13-12-04; мера сопротивления P3030 100 Ом; воздушный термостат Measurement International 9300. Измерения зависимости U_{cm} от температуры проводились в диапазоне рабочих температур в точках минус 10°C , $+20^\circ\text{C}$, $+45^\circ\text{C}$, $+65^\circ\text{C}$.

Получены следующие результаты испытаний, подтверждающие эффективность разработанных конструкции и технологии изготовления ультра-прецизионных стабилизаторов 2СП101А...2СП501Д: αU_{cm} в диапазоне температур $10^\circ\text{C} \div 65^\circ\text{C} \rightarrow$ минус $0,00019\%/^\circ\text{C}$; δU_{cm} за 2040 ч. $\rightarrow 22,5$ мкВ; $\Delta U_{л.см.}$, рассчитанная для температур минус 10°C , 45°C , 65°C , $\rightarrow 270$ мкВ; $U_{ш.}$ в диапазоне частот $(0,1 \div 10)$ Гц $\rightarrow 1,47$ мкВ; дифференциальное сопротивление при токе $7,5$ мА $\rightarrow r_d \leq 7,0$ Ом.

Температурная зависимость U_{cm} при токе 7,5 мА УАПС в однокристалльном исполнении представлена на рисунке 5.12:

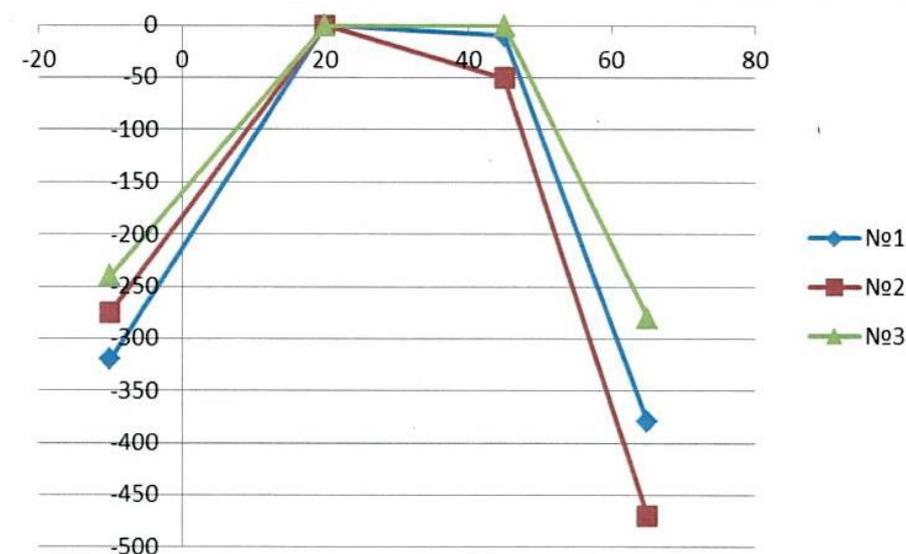


Рисунок 5.12 – Температурная зависимость однокристалльных экспериментальных образцов прецизионных термокомпенсированных стабилизаторов. По оси x указана температура в $^{\circ}\text{C}$, по оси y – изменение напряжения стабилизации в мкВ относительно значения при $+20^{\circ}\text{C}$

График зависимости напряжения стабилизации прецизионных стабилизаторов 2СП301А при испытаниях на безотказность в рабочем режиме при температуре 125°C от времени представлен на рисунке 5.13:

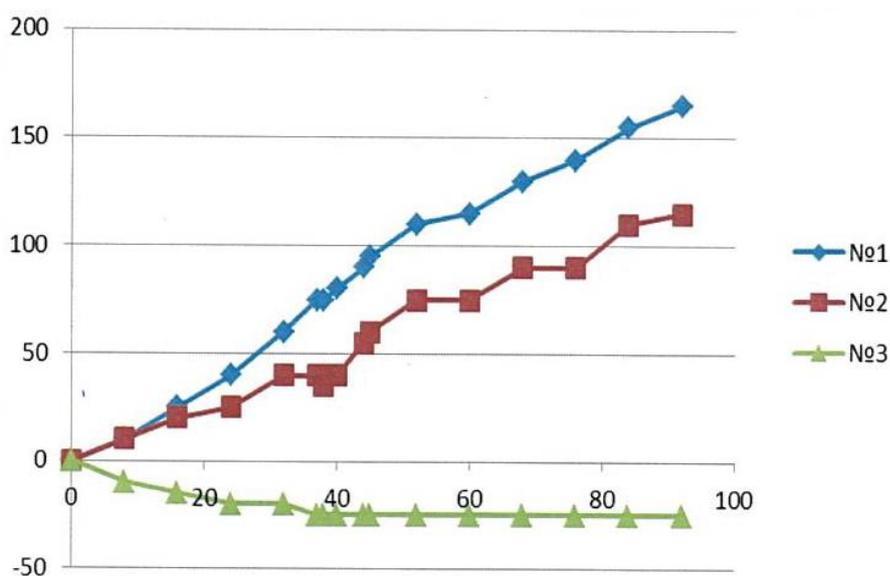


Рисунок 5.13 – Временная нестабильность напряжения стабилизации экспериментальных образцов прецизионных термокомпенсированных стабилизаторов. По оси x показано время измерения в сутках, по оси y – изменение напряжения стабилизации в мкВ относительно начального значения

В соответствии с техническими требованиями к разработке и по результатам испытаний опытных образцов стабилитронов серии 2СП101А÷2СП501Д в технических условиях значение их временной нестабильности установлено 0,0002 % (*2ppm*) за 1000 ч.

Разработка УАПС потребовала создания собственного прецизионного метрологического комплекса на основе 10-ти вольтовой меры напряжения Н4-21 класса точности 0,1 *ppm* – практически вторичного эталона Вольта с матрицей элементов Джозефсона, разработанного по нашим техническим требованиям АО «ФНПЦ «ННИПИ «Кварц» имени А.П. Горшкова», Н.Новгород, поверенного относительно первичного эталона Вольта в головном институте Госстандарта ФГУП «ВНИИМ», г.СПб. В метрологический комплекс вошли также эталонный мультиметр Fluke 8508A, вольтметр-калибратор К6-10ВК, мера напряжения К6-10МН, мера отношения напряжений К6-10МО, вольтметр-калибратор В2-43, программируемый источник прецизионного тока Keithly 6220 и прецизионные криостаты, термостаты классов точности 0,1 и 0,05°С – циркуляционный термостат LOIP LT-400, специальная кассетная камера холода и тепла КХТ-0,4, термоустановка SM-408-CD.

Созданный метрологический комплекс размещён в специально построенном для аттестации УАПС экранированном помещении с точностью поддержания температуры $22 \pm 1^\circ\text{C}$, с автономным питанием и электрометрическим заземлением с сопротивлением менее 0,4 Ом.

5.2.3 Внедрение ультра-прецизионных термокомпенсированных стабилитронов в серийное производство

Таким образом, результаты разработки технологии высококонцентрационной диффузии As, разработки и исследования НВ диффузионных *p-n*-структур обеспечили разработку и внедрение в производство серии ультра-прецизионных, в т.ч. аттестуемых, термокомпенсированных стабилитронов специального применения 2СП101А÷2СП501Д.

К приоритетным областям применения прецизионных и ультра-прецизионных термокомпенсированных стабилитронов, помимо создания на их основе эталонных мер напряжения (эталон Вольта), следует отнести ракетно-космическую технику и технику прецизионной измерительной аппаратуры.

В частности, для измерения кажущегося ускорения движущегося в пространстве тела в ракетно-космической технике (РКТ) широкое применение нашли маятниковые компенсационные акселерометры, в составе которых используется аналогово-цифровой преобразователь (АЦП). С помощью АЦП значение входного тока сравнивается с эталонным значением тока. К эталонному току в схеме АЦП предъявляются жесткие требования по достижению низкой величины временной и температурной нестабильности.

Наибольшее влияние на стабильность эталонного тока оказывает входящий в его состав источник опорного напряжения (ИОН) [135]. Низкий уровень температурного дрейфа эталонного тока достигается расположением основных элементов источника тока в термостате. Но этого, очевидно, недостаточно. Поэтому одним из приоритетов получения требуемого уровня стабильности эталонного тока является снижение его собственной зависимости от температуры. Температурный коэффициент эталонного источника тока определяется главным образом температурным коэффициентом выходного напряжения ИОН [136].

В качестве ИОН в АЦП маятникового компенсационного акселерометра применяется аттестуемый ультра-прецизионный термокомпенсированный стабилитрон (УАПС) с напряжением стабилизации (U_{cm}) $\sim 6,1$ В.

Ультра-прецизионные термокомпенсированные стабилитроны с повышенной РС нашли применение также в качестве базовых элементов в конструкциях ряда прецизионных термокомпенсированных стабилитронов в гибридном интегральном исполнении (источники опорного напряжения ИОН), разработанных АО «НЗПП с ОКБ»: ОКР «НОЛЬ», ОКР «НЕОЗОЙ-2», ОКР «ВОЛЬТ-И8», ОКР «СИЛА-И7-РК» → схемы 1380ЕС013, 1380ЕН014, 1394ЕС013, 1380ЕС025 ÷ 065 (7 типоминалов).

В настоящее время радиационнотойкие прецизионные термокомпенсированные стабилитроны – одна из ключевых научно-технических компетенций АО «НЗПП с ОКБ» [137].

Выводы к главе 5

1. На основе пакета экспериментальных зависимостей характеристических электрических, конструкционных и технологических параметров от удельного сопротивления подложки, плотности тока через $p-n$ -переход и технологических режимов изготовления НВ $p-n$ -структур разработана феноменологическая методика расчёта ультра-прецизионных термокомпенсированных стабилитронов, позволяющая рассчитать параметры конструкции и технологические режимы изготовления прецизионных ТКС применительно к широкому диапазону токов стабилизации.

2. Впервые полученная экспериментальным путём зависимость нелинейности напряжения стабилизации в диапазоне температур ($\alpha U_{ст}, \%/^{\circ}C$) термокомпенсированного стабилитрона ($\Delta U_{л.ст.}, мкВ$) от напряжения пробоя и плотности тока через основной $p-n$ -переход ТКС ($U_{проб.о}, J_{p-n.о}$), позволила включить этот важный параметр в состав феноменологической методики расчёта конструкционных и технологических параметров ТКС, причём в качестве отправной позиции алгоритма расчёта.

3. Теоретически и экспериментальным способом 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 ($U_{пр.к}$).

4. Экспериментальным путём показано, что эффективное повышение радиационной стойкости низковольтных термокомпенсированных стабилитронов достигается за счёт применения двухкристальной конструкции с легированием золотом кристалла с компенсирующим $p-n$ -переходом.

5. Для метрологического обеспечения разработки, исследований и производства аттестуемых термокомпенсированных стабилитронов повышенной

точности (УАПС) создан специализированный прецизионный метрологический комплекс на основе 10-ти вольтовой меры напряжения Н4-21 класса точности 0,1 *ppm* в специальном экранированном, термостатированном помещении с автономным питанием и электрометрическим заземлением.

6. На основе результатов разработки технологии получения НВ диффузионных *p-n*-структур с туннельным и смешанным механизмами пробоя по способу высококонцентрационной диффузии As и разработки НВ термокомпенсированных стабилитронов серии 2С198А÷2С198К разработана промышленная технология изготовления и внедрена в производство серия НВ ультра-прецизионных термокомпенсированных стабилитронов 2СП101А÷2СП501Д с напряжением стабилизации 6,1 В при токе 7,5 мА класса точности до 0,0002% (2 *ppm*).

7. Прецизионные термокомпенсированные стабилитроны с повышенной радиационной стойкостью с напряжением стабилизации 6,1 В при токе 500 мкА применены 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 (7 типономиналов).

ГЛАВА 6 РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО НИЗКОВОЛЬТНЫХ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

6.1 Кремниевые ограничители напряжения – новый класс приборов защиты в отечественной электронике

Надежность и работоспособность радиоэлектронных устройств (РЭУ) в значительной степени определяются её чувствительностью к кратковременным электрическим перегрузкам, причиной которых могут быть электромагнитные поля искусственного или естественного происхождения. Источники таких полей – грозовые разряды, разряды статического электричества (ESD), коммутационные процессы, мощные радиопередающие средства, РЛС, высоковольтные ЛЭП и любые другие, и, наконец, – эмитируемые ядерным взрывом [138–140].

Особые требования к надёжности электронных устройств, к их защищённости от случайных перенапряжений предъявляются в атомной промышленности [141].

Кремниевые ограничители напряжения выполняют функцию защиты электронных элементов, присутствующих непосредственно в составе РЭУ, от наведённых в электрических сетях ЭМИ различной природы. В отличие от традиционных элементов защиты – газовых разрядников и варисторов, кремниевые ОН, обладая высоким уровнем быстродействия ($t_{вкл.}$ до 1 нс.), низким коэффициентом ограничения перенапряжения (обычно $K_{огр.и.} \leq 1,3$, для НВ ОН $K_{огр.и.} \leq 1,7$), высокой долговечностью, чрезвычайно эффективны, принимая на себя и рассеивая паразитные ЭМИ. Зачастую, для достижения высшей эффективности защиты РЭА, применяется последовательный каскад из этих трёх элементов: газовый разрядник – варистор – ограничитель напряжения.

Осознание опасностей, обусловленных воздействием импульсных перенапряжений на РЭУ, и владение методами и средствами защиты от них приобретают, по мере развития электронной техники – автоматики, связи, аудио, видео, вычислительной, космической, автомобильной, корабельной, авиационной и др., все большую актуальность и значимость. Наиболее актуально применение кремниевых ограничителей напряжения для защиты от импульсных

перенапряжений в силовой электронике, цифровых интерфейсах, управляющих и телекоммуникационных схемах.

Устойчивость РЭУ к воздействию катастрофических электромагнитных импульсов находится в центре внимания разработчиков электронной аппаратуры. Особенно важно это для устройств с применением микро мощных интегральных схем.

Для обеспечения надежности и, соответственно, конкурентоспособности электронных изделий на мировом рынке внутри Европейского Сообщества (ЕС) разработаны и действуют международный стандарт ITC 801 (МЭК 801) и ряд других базовых документов, регламентирующих требования к устойчивости РЭУ к импульсным перегрузкам.

Ограничители напряжения – относительно новый в отечественной практике, чрезвычайно востребованный класс ППП. Первыми, по заказу МО СССР, в 1984 г. разработаны на основе оригинальной высококонцентрационной длительной диффузии As и внедрены в серийное производство низковольтные ОН 2С408А с напряжением пробоя 6,2 В и импульсной мощностью 1,5 кВт [142, 143]. И в настоящее время ограничители 2С408А, предназначенные для защиты РЭУ с напряжением питания 5 В, остаются самыми востребованными. Далее разработаны и внедрены в серийное производство ещё более низковольтные 1,5 кВт-ные ограничители напряжения 2С414А с напряжением пробоя 3,9 В [144, 145].

Тогда же, в связи с приобретением лицензии на производство автоматических электронных телефонных станций типа ЭАТС МТ-20 у французской фирмы Thomson CSF, в порядке импортозамещения, ограничителей напряжения (Transient Voltage Suppressors) типов 1,5КЕ8V2АС, 1,5КЕ15А, 1,5КЕ75А, массово применявшихся в этих станциях [146, 147], были разработаны и освоены в серийном производстве 1,5 кВт-ные ограничители напряжения КС410АС ($U_{\text{проб}} 8,2 \text{ В}$), КС511А ($U_{\text{проб}} 15 \text{ В}$), КС511Б ($U_{\text{проб}} 75 \text{ В}$). Симметричные ограничители напряжения КС410АС с напряжением пробоя 8,2 В разработаны на основе технологии ампульной двухсторонней диффузии As. Фабрика по производству таких станций была построена в г.Уфа.

Освоение ограничителей КС410АС, КС511А, КС511Б в серийном производстве произведено в 1989 г. также, в порядке дублирования, на предприятии АО «ФОТОН», г.Ташкент, Узбекистан. Тем самым, кстати, положено начало созданию направления разработки и производства ограничителей напряжения в этой республике.

Ограничители напряжения (ОН) – полупроводниковые приборы (ППП), в основе конструкции которых – кремниевые *p-n*-структуры, работающие на эффекте обратимого электрического пробоя обратно смещённого *p-n*-перехода при воздействии импульсного перенапряжения.

На рисунке 6.1 представлены вольтамперные характеристики несимметричных и симметричных ограничителей напряжения.

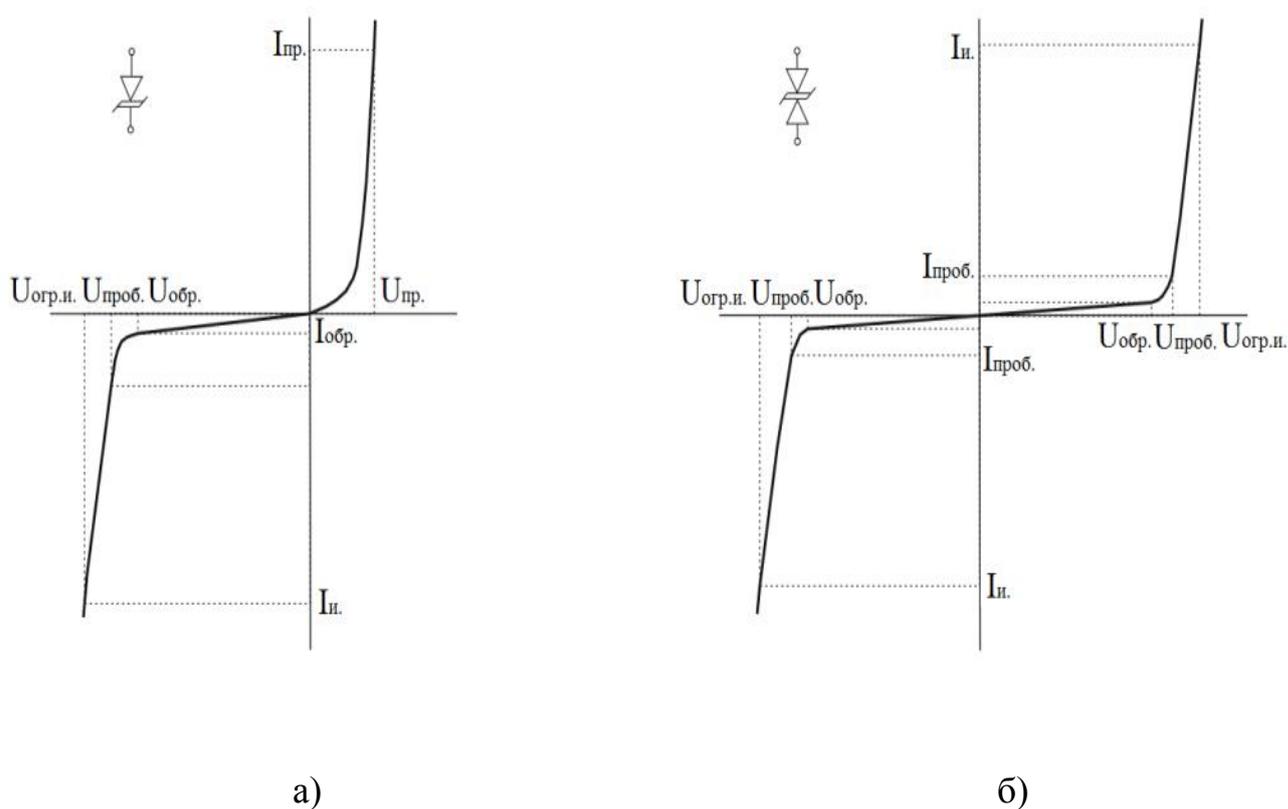


Рисунок 6.1 – Вольтамперные характеристики несимметричных (а) и симметричных (б) ограничителей напряжения

Основные характеристические и эксплуатационные параметры ОН:

$U_{проб}$, В, – напряжение пробоя при заданном тестовом токе I_T ;

$U_{обр}$, В, – обратное напряжение (соответствует напряжению питания защищаемой микросхемы);

$I_{обр}$, мА, – постоянный обратный ток при обратном напряжении $U_{обр}$;

$I_{и.макс}$ – предельно допустимый импульсный ток;

$U_{огр.и}$, В, – максимальное импульсное напряжение ограничения при предельно допустимом импульсном токе ($I_{и.макс}$). Соответствует предельно допустимому напряжению защищаемой схемы;

$K_{огр.и} = U_{огр.и}/U_{проб}$ – коэффициент ограничения, характеризующий величину остаточного перенапряжения, т.е. эффективность защиты электронных компонентов от импульсных электрических перегрузок;

$t_{вкл}$, с, – время включения (расчётное), характеризует быстродействие прибора. Зависит от конструкции ОН. Для ОН, работающих на обратной ветви ВАХ, $t_{вкл}$ определяется временем пролета основных носителей через область пространственного заряда обратно смещенного $p-n$ -перехода ($t_{вкл} \approx 10^{-12}$ с);

$P_{и.макс}$, Вт, – максимально допустимая импульсная мощность, рассеиваемая ОН при заданном тестовом импульсе тока (прямоугольной, синусоидальной и экспоненциальной формы). Обычно, ограничители напряжения принято тестировать импульсами экспоненциальной формы с длительностью (τ_u) либо 1 мс (10/1000 мкс), либо 20 мкс (8/20 мкс), рисунок 6.2.

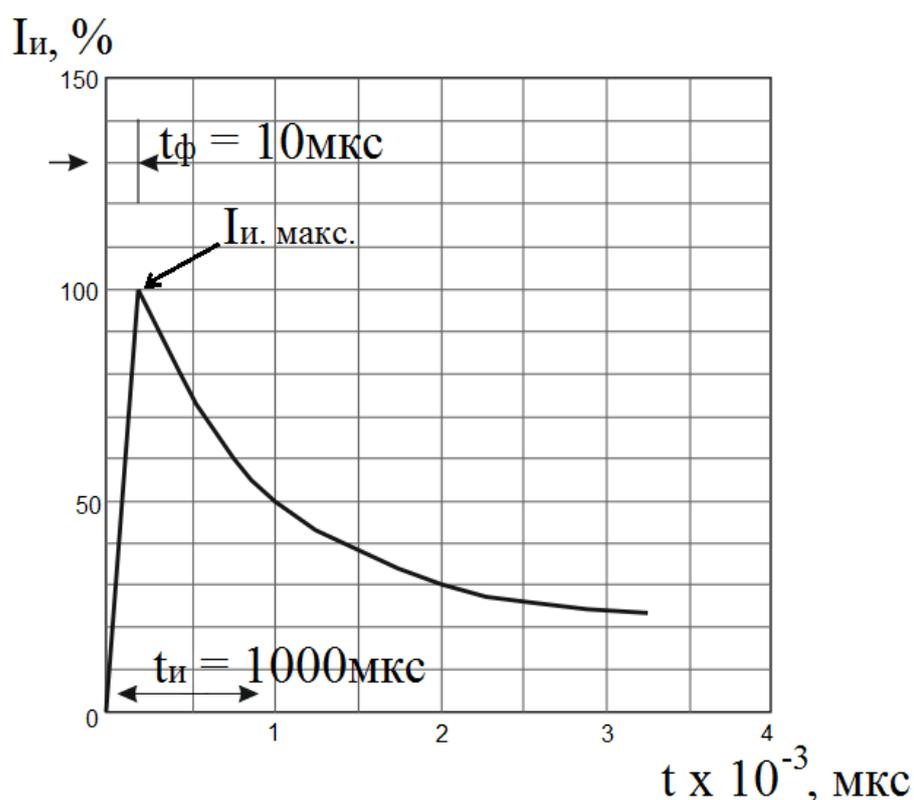


Рисунок 6.2 – Тестовый импульс тока экспоненциальной формы с длительностью 1 мс (10/1000 мкс)

Конструкции ограничителей напряжения существенно отличаются от конструкций выпрямительных диодов и стабилитронов, что обеспечивает достижение более высоких значений пиковых токов и мощностей.

Отличия ограничителей напряжения от стабилитронов следуют в основном из того, что отличаются условия их применения: стабилитроны, как источники опорного напряжения, “работают” в статическом режиме, обеспечивая требуемое напряжение стабилизации (опорное напряжение) при заданном постоянном токе стабилизации (рисунок 6.3 а); ограничители напряжения в схеме применения находятся в состоянии ждущего режима в предпробойной области ВАХ и “срабатывают” при возникновении в цепи импульса перегрузки, ограничивая (поглощая и рассеивая) паразитный импульс на уровне импульсного напряжения ограничения (рисунок 6.3 б):

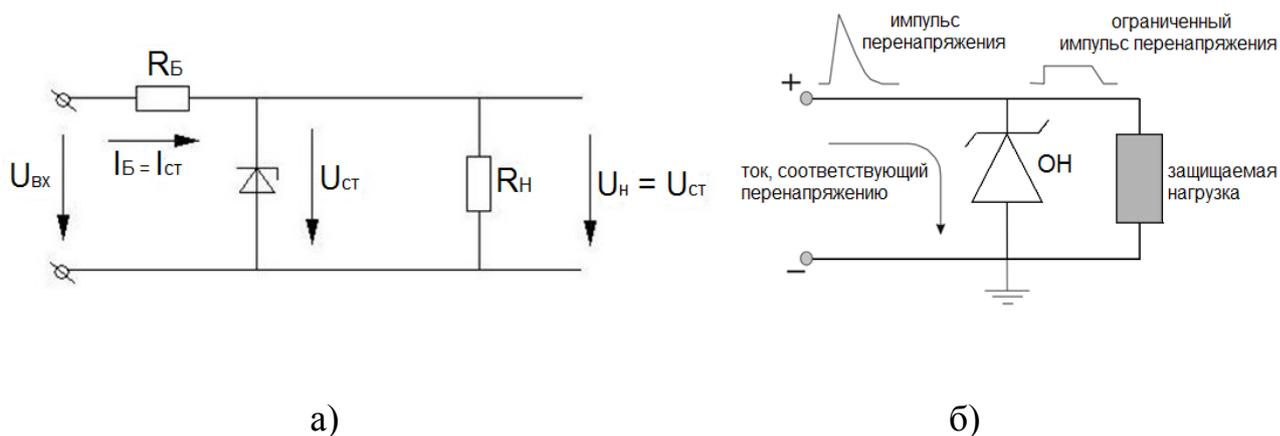


Рисунок 6.3 – Схемы включения стабилитронов (а) и ограничителей напряжения (б)

Также, в отличие от стабилитронов, в конструкциях ограничителей напряжения предусмотрены элементы, обеспечивающие повышенную относительно стабилитронов, рассеиваемую импульсную мощность. В принципе, и тот и другой типы ППП могут быть “пронормированы” одновременно и как стабилитроны и как ограничители напряжения. Пользуясь этим, потребители зачастую применяют стабилитроны в качестве маломощных ограничителей напряжения.

6.2 Физические аспекты работы ограничителей напряжения

Основной фактор, поражающий элементы РЭУ, - воздействие наводимых в коммутационных цепях РЭУ паразитных импульсных токов и напряжений значительной амплитуды, приводящих при достижении ими некоторой критической величины импульсной мощности ($P_{и.кр.}$) к повреждению кристаллической структуры и тепловому пробоем кремниевого $p-n$ -перехода.

По характеру влияния, эффекты воздействия электрических импульсов на параметры $p-n$ -структур делят на обратимые и необратимые (остаточные).

Обратимые эффекты вызывают временную потерю работоспособности ППП, временные изменения их внутреннего состояния и ухода их электрических параметров за допустимые пределы. Необратимые, остаточные эффекты, связанные с критическим нарушением электрического и теплового режимов работы, могут носить параметрический характер (выход одного или группы

параметров за допустимые пределы) или форму катастрофического отказа. Нужно заметить, что чисто обратимых эффектов воздействия на параметры $p-n$ -структур паразитных импульсов не бывает. Определённые “микро остаточные” явления имеют место в любом случае. Постепенно накапливаясь, такие явления приводят, в конечном счёте, к деградации и катастрофическому отказу ОН. Эти эффекты относятся к представлению о важнейшей функциональной характеристике ОН – импульсной стойкости (предельное количество импульсов перегрузки, которое ограничитель напряжения способен выдержать без потери своей функциональности $\rightarrow N_{u.кр.}$).

При воздействии на $p-n$ -структуру импульсного тока критической величины ($I_{u.кр.}$) наблюдается эффект теплового пробоя в виде локального проплавления кремния и, как следствие, короткое замыкание $p-n$ -перехода. Явление теплового пробоя в обратно смещённом $p-n$ -переходе есть результат достижения температуры, соответствующей собственной проводимости кремния в локализованной области на относительно слаболегированной стороне перехода.

Расчёт температуры собственной проводимости, т.е. критической температуры $p-n$ -перехода ($T_{кр.}$) при которой локальное сопротивление падает, локальная плотность тока резко возрастает и происходит тепловой пробой [148]:

$$T_{u.кр.} = \frac{1000}{0,87 + 0,39 \cdot \lg U_{проб}} \quad (6.1)$$

даёт следующие значения T_{p-n} для ограничителей напряжения с $U_{проб}$ 15 В; 6,8 В; 6 В; 3 В: (753, 837, 852, 946)°С, соответственно.

Так как импульсный ток через ОН (тестовые импульсы 10/1000 мкс, 8/20 мкс) может достигать сотен и тысяч ампер, крутизна обратной ветви ВАХ ОН определяется не только динамическим сопротивлением $p-n$ -перехода, но и, в значительной степени, падением напряжения на базе и сопротивлениями омических контактов и выводов:

$$U_{огр.и} = I_{и} \left[r_{д} + \rho_{б} \left(\frac{W_{б}}{S_{p-n}} \right) + R_{к} + R_{в} \right], \quad (6.2)$$

где $U_{огр.u}$ – импульсное напряжение ограничения, I_u – импульсный ток, r_d – динамическое сопротивление, R_k, R_e – сопротивления контактов и выводов, ρ_b – удельное сопротивление базы, W_b – ширина базы, S_{p-n} – площадь $p-n$ -перехода.

В отличие от стабилитронов, работающих в условиях рассеяния постоянной мощности, ограничители напряжения функционируют в динамическом импульсном режиме, при котором необходимо рассеяние кратковременной мощной тепловой волны, возникающей в области пространственного заряда $p-n$ -перехода. Эффективное поглощение тепловой волны от $p-n$ -перехода ОН достигается тем, что кристалл ОН помещается между двумя массивными теплоотводящими металлическими дисками.

Толщина дисков должна быть соизмерима с длиной тепловой волны (L) из области $p-n$ -перехода при воздействии импульса перегрузки [149]. В соответствии с принципом электро-тепловой аналогии тепловое сопротивление (R_m) представляется в виде, подобном закону Ома:

$$R_m = L/A \cdot k, \quad (6.3)$$

где k – теплопроводность материала. Для кремния $k = 141$ Вт/м·К при 300 К; A – площадь поперечного сечения теплового потока.

Аналогичным образом можно представить тепловую постоянную времени тепловой волны:

$$\tau_T = R_m \cdot C, \quad (6.4)$$

где C – теплоёмкость материала:

$$C = c \cdot \rho \cdot L \cdot A, \quad (6.5)$$

где c – удельная теплоёмкость материала для кремния $c = 670$ Дж/кг·К; ρ – плотность материала (для кремния $\rho = 2300$ кг/м³).

$$\text{Из (5.3 – 5.5) следует: } \tau_u = \sqrt{k \cdot \tau \cdot T / c \cdot \rho} \quad (6.6)$$

Если длительность теплового воздействия сравнима с длительностью одиночной импульсной перегрузки (τ_u), можно представить значения длины тепловой волны (L) в кремнии при комнатной температуре, таблица 6.1.

Таблица 6.1 – Зависимость длины тепловой волны (L) в кремнии от длительности импульса (τ_u)

τ_u , мкс	10	100	1000	10000
L , мкм	31	95	310	950

Отсюда следует, что, для импульсов с длительностью ~ 1 мс желательна толщина дисков не менее 0,5 мм.

6.3 Принципы конструирования и технологии изготовления ограничителей напряжения

Представленная в настоящей работе информация – результат создания направления отечественных кремниевых ограничителей напряжения и, в первую очередь, – низковольтных. В отличие от, например, развития направления отечественных НВ планарных стабилитронов, представленного в настоящей работе, на основе результатов разработки теории и принципов конструирования ВВ стабилитронов как зарубежными, так и отечественными исследователями, основные принципы конструирования и технологии изготовления отечественных кремниевых ограничителей напряжения, в том числе низковольтных (предмет настоящей работы), разработаны на базе собственных теоретических оценок и экспериментальных результатов при практически полном отсутствии информации о зарубежном опыте в этой области полупроводникового приборостроения. Способствовал этому опыт разработки и производства аналогичных по технологии изготовления и близких по конструкции ВВ и НВ стабилитронов – одной из основных компетенций Новосибирского Завода Полупроводниковых Приборов с Особым Конструкторским Бюро (АО «НЗПП с ОКБ»). В частности, – опыт получения низковольтных p - n -переходов по технологии высококонцентрационной диффузии As в сильнолегированный кремний. Владение этой технологией и опытом её применения в производстве НВ стабилитронов позволили разработать и первыми, из разработанного позже массива ограничителей напряжения различной мощности и в различном корпусном исполнении, внедрить в серийное

производство, пожалуй, самые востребованные 1,5-кВт-ные ограничители напряжения 2С408А с напряжением пробоя 6,2 В [142, 143].

На рисунке 6.4 представлены несколько конструктивно-технологических вариантов изготовления кристаллов ограничителей напряжения.

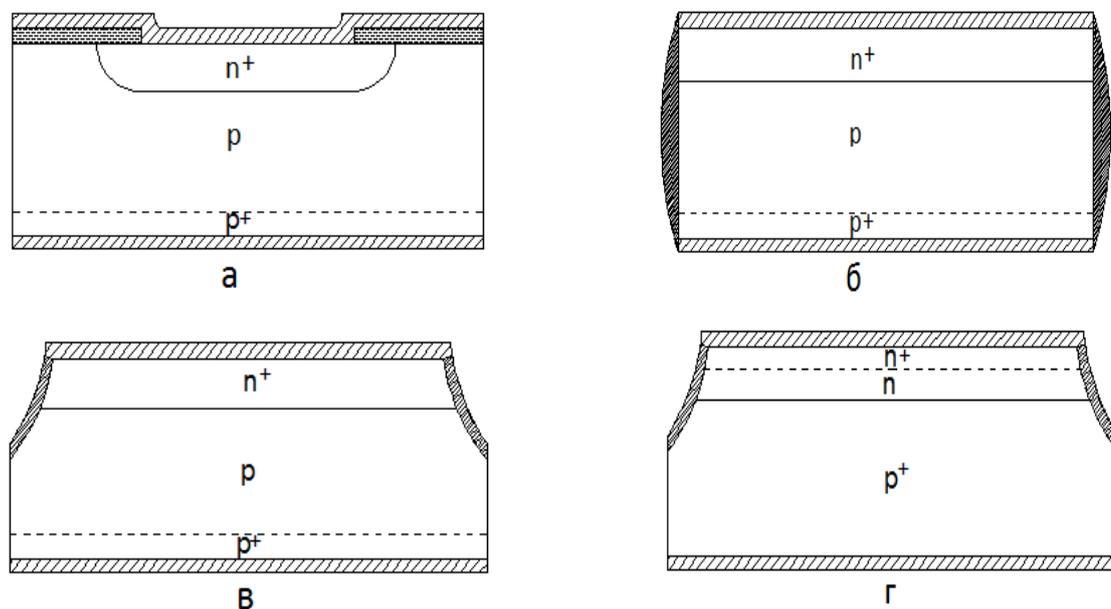


Рисунок 6.4 – Варианты конструкций кристаллов ограничителей напряжения: а – классическая планарно-диффузионная p - n -структура; б – диффузионная; в – меза-диффузионная; г – меза-эпитаксиальная

Наиболее востребована из них – меза-эпитаксиальная технология. Однако, как это уже отмечено выше, использование меза-эпитаксиальной технологии для производства низковольтных p - n -структур в России нецелесообразно по соображениям экономического плана.

Основные принципы конструирования и технологии изготовления ограничителей напряжения можно подытожить следующим образом:

1. Рабочий p - n -переход в кристалле силового прибора предпочтительно должен быть плоским, что достигается либо “сплошной” диффузией легирующей примеси в кремниевую пластину с выходом p - n -перехода на тонкую торцевую поверхность кристалла, либо использованием меза – диффузионной / эпитаксиальной технологии (рисунок 6.4 в, г).

2. Базовая область кристалла ОН должна быть как можно более тонкой – принцип тонкой базы: чем тоньше относительно высокоомный базовый слой (W_6), тем меньше сопротивление растекания ($R_{расст.} = \rho_v \cdot W/S_{p-n}$) и, соответственно, падение напряжения на базе, то есть выделение на базе греющей мощности, что приводит к повышению коэффициента ограничения ($K_{огр.у}$). Особенно это ощутимо при воздействии предельных по мощности и амплитуде тока коротких импульсов ($\tau_u < 1$ мс).

3. Следует стремиться к формированию p - n -перехода на максимально возможной глубине (x_j). Как показано выше, p - n -переход в процессе эксплуатации ограничителя напряжения подвергается циклическим воздействиям «импульсный нагрев (до температур, близких к критическим, т.е. порядка $700^\circ\text{C} \div 900^\circ\text{C}$) – охлаждение». Причём, чем ниже величина $U_{проб}$ ограничителя, тем больше амплитуда импульсного тока, соответствующая данной допустимой импульсной мощности ОН, тем выше всплеск температуры на p - n -переходе. Вероятный механизм деградации ОН при воздействии мощных импульсов тока связан с накоплением механических напряжений в области спая кристалла с теплоотводящим диском вследствие циклического эффекта «нагрева – охлаждения» области спая под действием тепловой волны, распространяющейся из области p - n -перехода. В свою очередь, поле механических напряжений, распространяющееся из области спая в кремний, создаёт поле структурных нарушений решётки кремния, которое, достигая области p - n -перехода, приводит к деградации его параметров. И это воздействие тем “эффективнее”, чем ближе p - n -переход к поверхности кристалла.

Визуально это проявляется в виде нарастающего смягчения обратной ветви ВАХ ограничителя при наблюдении ВАХ на осциллографе или измерении тока утечки ($I_{обр}$) при определённом обратном напряжении ($U_{обр}$) после воздействия ограниченных пачек импульсов вплоть до критического импульса. Аналогичный эффект снятия напряжений наблюдается с пластмассовым шариком при игре в настольный теннис, проявляющийся в виде “неожиданной” трещины после

многочисленных ударов ракеткой. Наблюдаемый эффект отказа ОН в процессе импульсной наработки можно было бы назвать “эффектом пинг-понга”.

Температура плавления припоя ПСр_{2,5} (обычно применяется припойная прокладка толщиной ~50 мкм), используемого для пайки арматур ОН, ~380°C. При воздействии критических импульсов тока имеет место даже расплавление припоя в области спая с последующим охлаждением до практически комнатной температуры. Например, при воздействии критических импульсов тока на ОН в пластмассовом корпусе, если толщина пластмассовой стенки корпуса была менее ~0,5 мм, наблюдалось растрескивание стенки и выброс припоя в виде его капельных выходов из трещины. Поэтому при конструировании ОН в пластмассовых корпусах типов КД-7Л, КД-7Е, КД-7К (ГОСТ 18 472) необходимо обращать на это внимание.

Т.о., *p-n*-переход, как источник тепловой волны, должен располагаться как можно дальше от области спая. По-видимому, для силовых диодов идеальным следует считать расположение *p-n*-перехода в середине кристалла. Для силовых ППП, к которым следует отнести разработанные на основании результатов настоящей диссертации 1,5-кВт-ные ограничители напряжения 2С408А, 2С414А, КС410АС, на достаточной глубинной не менее 10 мкм, как показано ранее для сверхмощных ограничителей напряжения (ОНС) [150].

4. Пассивация *p-n*-переходов ОН осуществляется разными способами. Наиболее эффективным, хотя и не очень распространенным, является способ защиты *p-n*-переходов полисилоксановым компаундом, например, типа 159-167 (СИЭЛ). Этот способ особенно эффективен для защиты высоковольтных (более 200 В) *p-n*-структур ОН, по двум причинам:

а) компаунд, в отличие от традиционной защиты *p-n*-переходов оксидом кремния (SiO₂), не содержит встроенный положительный заряд, приводящий к сужению области пространственного заряда *p-n*-перехода в месте выхода его на поверхность кристалла кремния и, соответственно, к повышению напряжённости поля в месте его выхода на поверхность;

б) технология изготовления кристаллов ОН с СИЭЛ-защитой даёт возможность использовать максимально возможную для соответствующего конструктива ОН площадь p - n -структуры, чем достигается предельно возможная рассеиваемая мощность. Существенный недостаток СИЭЛ-способа защиты – избыточно трудоёмкая технология.

В большинстве случаев пассивация p - n -переходов кристаллов ОН, изготавливаемых с применением меза-технологии, осуществляется тонкими диэлектрическими слоями групповым методом. В качестве таковых применяют, как правило, многослойную защиту в виде, например, термического оксида кремния (SiO_2), фосфоросиликатного стекла (ФСС) и нитрида кремния (Si_3N_4). Компания Diotec использует плазменное травление мез и плазменную пассивацию p - n -переходов нитридом кремния с последующим заполнением мез полисилоксаном [151]. Ведущие зарубежные предприятия применяют наиболее прогрессивную в настоящее время технологию заполнения мез свинцовосиликатным стеклом, также, как и в случае СИЭЛ-защиты, не содержащим встроенный положительный заряд [156, 157].

5. Площадь p - n -перехода ограничителя напряжения (S_{p-n}), соответственно – кристалла, должна быть по возможности максимальной для данной конструкции прибора, вследствие того, что предельно допустимая импульсная рассеиваемая мощность ей прямо пропорциональна.

Поэтому обычно применяют кристалл ОН шестигранной формы, что позволяет использование стандартных способов линейного разделения пластин со структурами на кристаллы (лазерная, дисковая резки). Круговая форма кристалла нетехнологична (ультразвуковая резка), хотя случаи применения кристаллов ППП такой формы, в частности, мощных выпрямительных диодов, известны (АО «ФОТОН», Ташкент).

6. В качестве омических контактов к кристаллу ОН применяют типичные в электронной промышленности слои металлов и их комбинации (Ti-Ni , Ti-Ni-Au , Al-Ni , V-Ag и т.п.), обеспечивающие низкие значения сопротивлений омических контактов, хорошую адгезию к кремнию и хорошее растекание припоя, то есть

необходимую высокую сплошность и адгезию паяного соединения. Минимизация контактных сопротивлений в конструкции ОН, испытывающих воздействие токов перегрузки с плотностью до 10^5 А/см² и более, чрезвычайно важна. Из этого вытекают жёсткие требования к технологиям нанесения омических контактов и пайке арматур ОН, определяя обязательность использования безмасляной откочки в установках нанесения тонких металлических плёнок и пайки арматур ОН в предварительно подогретом осушенном до точки росы не менее минус 70°С водороде.

7. Эпитаксиальный вариант (см. рисунок 6.4 г) наилучшим образом отвечает основным требованиям к кристаллу ОН. В частности, к выполнению принципа тонкой базы. Именно по этой причине при конструировании ОН предпочтительно применять эпитаксиальные структуры. Однако, в силу определённых особенностей / ограничений, в т.ч. коммерческого характера, существующей технологии эпитаксиального наращивания сильно легированных слоёв кремния, требуемых для НВ *p-n*-структур НВ ОН, отечественное производство (ООО «ЭПИЭЛ», г. Зеленоград) производит эпитаксиальные структуры с $U_{проб}$ только свыше ~15 В.

8. Недостаток диффузионного способа формирования *p-n*-структур ограничителей напряжения (см. рисунки 6.4 в) – относительно большая толщина базы. Однако для НВ *p-n*-структур с туннельным пробоем, формируемых на основе сильно легированного кремния, это обстоятельство значения не имеет.

Кстати, в случае ВВ *p-n*-структур с лавинным пробоем экспериментальные данные для диффузионных и эпитаксиальных структур с одним и тем же типом проводимости базы (*n*-тип) и идентичными значениями $U_{проб}$ свидетельствуют о существенном превышении базовых сопротивлений эпитаксиальных структур (ЭС) над базовыми сопротивлениями диффузионных структур (ДС), что можно объяснить различием технологий достижения идентичных градиентов концентрации легирующей примеси в *p-n*-переходе. Например, для структур с $U_{проб}$ 100 В, изготовленных на ЭС и диффузионным образом на моно кремнии, соотношение базовых удельных сопротивлений (ρ_v) выглядит следующим образом:

1,5:0,3, что несколько уменьшает преимущество эпитаксиальных структур над диффузионными.

9. Квазиэпитаксиальный вариант (метод жидкостной эпитаксии [154, 155]), основанный на соединении кремниевых пластин разного типа проводимости методом капиллярного втягивания алюминия с последующей “прогонкой” алюминия через слой p -кремния в печи с градиентом температуры с последующим двухсторонним утонением p^+ - n -структуры, подлегированием n -слоя фосфором (n^+ -слой), защитой боковых граней кристалла оксидом кремния подкислением в разбавленной азотной кислоте и нанесением омических контактов.

Один из вариантов квазиэпитаксиального способа получения НВ ограничителей напряжения исследован в настоящей работе [156].

Маршрут изготовления p^+-n-n^+ -структуры по этому способу представлен на рисунке 6.5.

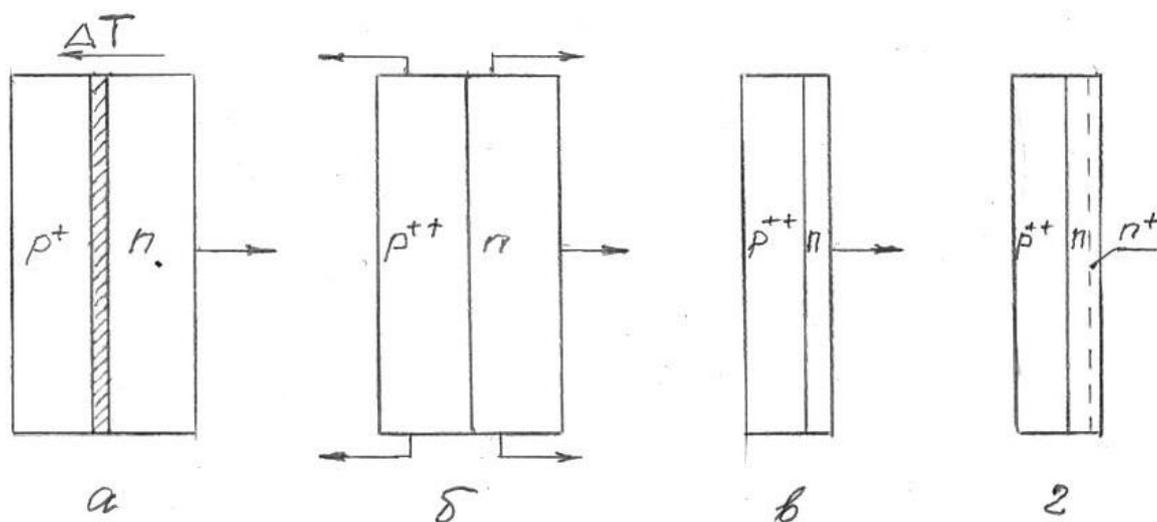


Рисунок 6.5 – Маршрут изготовления диффузионно-сплавной $p^{++}-n-n^+$ -структуры: *a* – сплавление p^+ -, n - пластин методом капиллярного втягивания алюминия с градиентом температуры; *б* – утонение блока пластин; *в* – диффузия донорной легирующей примеси в n -слой (подлегирование); *г* – $p^{++}-n-n^+$ -структура

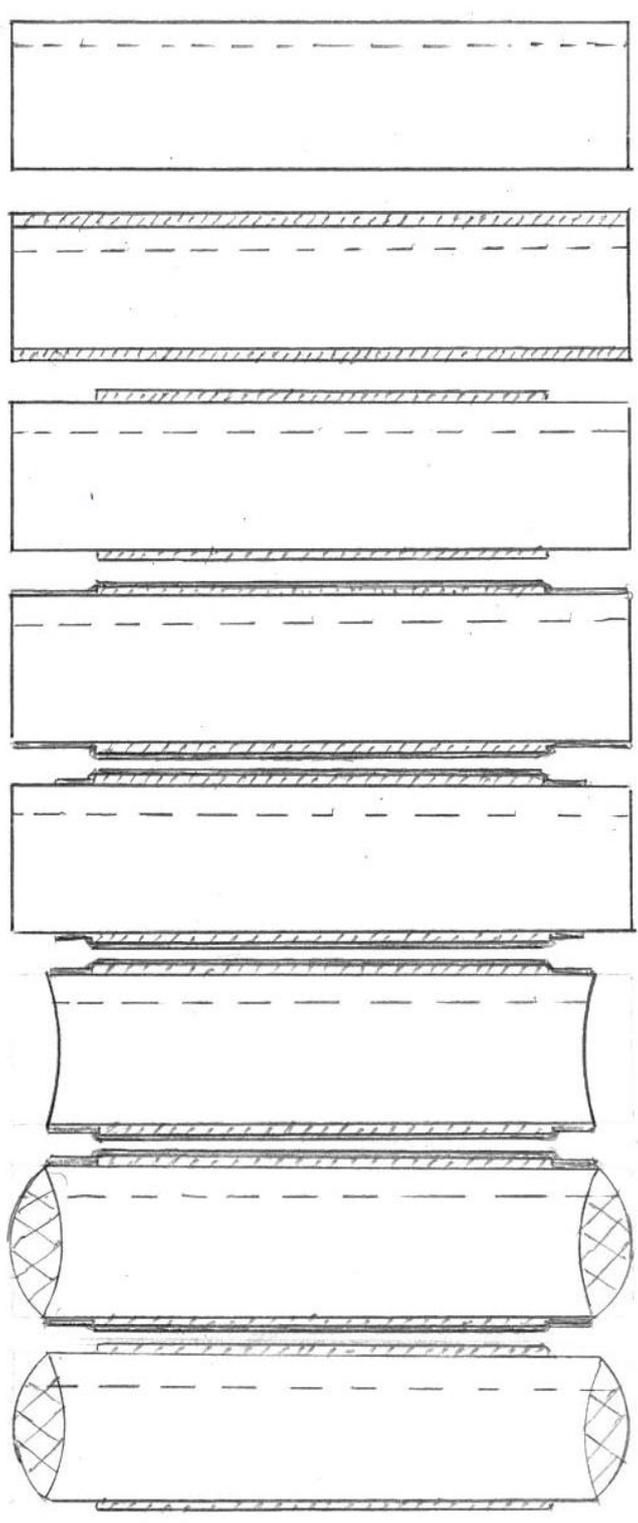
Запас по критической импульсной мощности для экспериментальных образцов 1,5 кВт-ных ограничителей напряжения с напряжением пробоя 22 В, изготовленных на основе квазиэпитаксиальных $p^{++} - n - n^+$ - кристаллов (рисунок 6.5) с толщиной n -базы ~ 50 мкм, превысил величину $P_{имп.кр.}$ аналогичных по напряжению пробоя и импульсной мощности серийных ограничителей напряжения, изготавливаемых по типовой диффузионной технологии на основе $p^{++} - n - n^+$ - структур с толщиной n -базы ~ 230 мкм, в 1,1 раза.

Квазиэпитаксиальная технология получения $p-n$ -структур (рисунок 4.6) также, как и технология сращивания кремниевых пластин, на современной стадии развития техники полупроводниковых приборов применения практически не нашла.

Низковольтные ОН производятся на основе монокристаллических пластинах диаметром 60 мм, что обусловлено необходимостью использования показанной выше технологии высококонцентрационной диффузии мышьяка. Используемые в серийном производстве эпитаксиальные $p-n^+$ - структуры с диаметром 76 мм это – область ограничителей напряжения с напряжением пробоя свыше 15 В.

Шестигранная форма кристалла обеспечивает высокий коэффициент использования площади кристаллодержателя в корпусе, в котором герметизируются кристаллы ограничителей. И тем самым, – достижение максимально возможной импульсной мощности ограничителя.

Принципиальным отличием технологий кристаллов ограничителей напряжения являются технологии диэлектрической защиты $p-n$ -перехода. Высокоэффективной защитой $p-n$ -переходов ОН показала себя технология защиты полисилоксановым компаундом типа 159-167 (СИЭЛ). На рисунке 6.6 представлена технологическая схема маршрута изготовления кристалла ограничителя напряжения, включающая операции организации защиты $p-n$ -перехода компаундом 159-167:



Диффузия мышьяка

Напыление V, Ag.

Гальваническое осаждение Ag

1-я фотолитография (по металлу)

Нанесение фоторезиста

2-я фотолитография (по фоторезисту)

Травление нарушенного слоя

Защита компаундом СИЭЛ

Снятие фоторезиста с омических контактов

Рисунок 6.6 – Схема технологического маршрута изготовления кристалла ограничителя напряжения с защитой *p-n*-перехода полисилоксановым компаундом 159-167

Возможны вариации этой технологии. Подобная защита применяется немецкой фирмой Diotec для защиты $p-n$ -переходов ОН, изготавливаемых по меза-диффузионной технологии, рисунок 6.7 [151]:

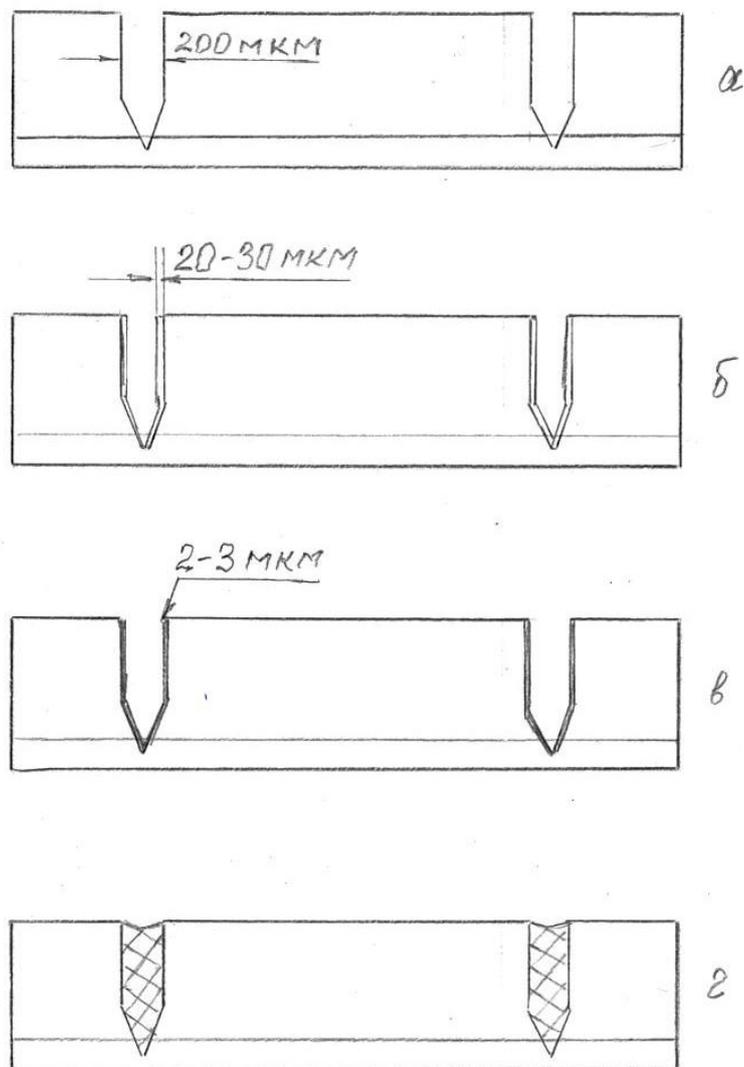


Рисунок 6.7 – Схема технологии защиты меза-диффузионного кристалла ограничителя напряжения ф. Diotec, ФРГ [151]:

- а – предварительный разрез;
- б – плазменное травление нарушенного слоя;
- в – плазменная пассивация (нитрид кремния) $p-n$ -переходов;
- г – защитный слой полисилоксана

В данном случае V-образные меза-канавки получают надрезом с помощью фасочного диска. Очистка $p-n$ -переходов осуществляется технологией

плазмохимического травления с последующей плазмохимической защитой тонким (2-3) мкм слоем нитрида кремния. Далее канавки заполняются полисилоксаном, и после его полимеризации по полисилоксану производится окончательное дисковое разделение пластин с *p-n*-структурами. Резка сквозь слой полисилоксана предотвращает загрязнение *p-n*-структуры кремниевой крошкой, обладающей проводимостью. Пассивирующий слой нитрида кремния обеспечивает хорошую изоляцию и защиту *p-n*-перехода от воздействия влаги. Эластичность полисилоксана способствует стойкости приборов к механическим воздействиям и термоударам.

Общим для вариантов рисунки 6.6, 6.7 является использование технологии полисилоксановой защиты плоских *p-n*-структур, выходящих на торцевую поверхность кристалла.

В процессе эксплуатации ограничитель напряжения подвергается воздействию импульсов тока с плотностью до $(10^4 \div 10^6)$ А/см². Соответственно, необходимо предпринимать специальные конструкционные меры по рассеянию и нейтрализации импульсных выбросов тепла в *p-n*-переходе. С этой целью кристалл ОН помещают между достаточно массивными теплоотводящими металлическими дисками (термокомпенсаторами). Металл дисков должен отличаться высокими теплопроводностью и теплоемкостью. В качестве таковых обычно рассматриваются серебро, медь, алюминий. Серебро – драгоценный металл, это серьезная причина отказаться от серебра в случае массового производства ОН. Алюминий требует специальных условий для пайки. Поэтому, как правило, для однокристалльных ограничителей напряжения с импульсной мощностью не более 5 кВт (импульс 10/1000 мкс) применяют медь. Медь покрывают либо никелем, либо серебром, что улучшает условия пайки.

Толщина теплоотводящих дисков должна быть соизмерима с длиной тепловой волны, распространяющейся при воздействии импульса из области *p-n*-перехода. В частности, для импульсов с длительностью ~1 мс желательна толщина дисков не менее 0,5 мм. Увеличение массы и размеров дисков заметно повышает

предельно допустимую импульсную мощность и импульсную наработку ограничителей напряжения.

Размеры и масса дисков не должны превышать планку, диктуемую законами термокомпенсации для таких разнородных по коэффициенту термического расширения материалов как кремний и металл. Для медных дисков – термокомпенсаторов с толщиной 0,5 мм в случае паяной конструкции ОН с импульсной мощностью до 5 кВт предельный диаметр диска, как показал эксперимент, ~6 мм. Практически это – размерный предел термокомпенсации системы кремний – медь. Для силовых ограничителей напряжения класса ОНС в качестве термокомпенсаторов применяют Mo, W. ОНС-ы – направление, прерогатива электротехнической промышленности.

Так как ОН должен выдерживать воздействие мощных импульсов тока, конструкцию ОН целесообразно делать паяной (металлургические контакты). В прижимной конструкции переходные сопротивления соединений ведут к существенному ограничению величины предельно допустимой импульсной мощности.

Для соединения деталей конструкции ОН пайкой целесообразно использовать мягкие припои на основе свинца, то есть с температурой плавления не выше 450°C. Причем, целесообразно — с некоторым содержанием серебра. Например, типа ПСр2.5. Серебро в припое препятствует накоплению механических напряжений в спае [157].

6.4 Теплофизический анализ конструкции ограничителей напряжения

При эксплуатации ограничителя напряжения в качестве защиты от воздействия наведённых паразитных электрических импульсов, в области *p-n*-перехода ограничителя выделяется импульсная мощность, распространяющаяся по конструкции ограничителя в виде “тепловой волны”. Для оптимизации конструкции ограничителя требуется представление о распределении при этом температуры по структуре диода и о температуре на его *p-n*-переходе. В качестве критериальных параметров при теплофизическом анализе конструкции ограничителя принимаются предельно допустимые импульсная мощность ($P_{и.макс}$)

и температура на $p-n$ -переходе ограничителя ($T_{p-n.макс}$). На рисунках 6.8, 6.9 представлены схема расчётной модели ограничителя и соответствующая ей термоэквивалентная схема ограничителя напряжения в корпусе КД-9:

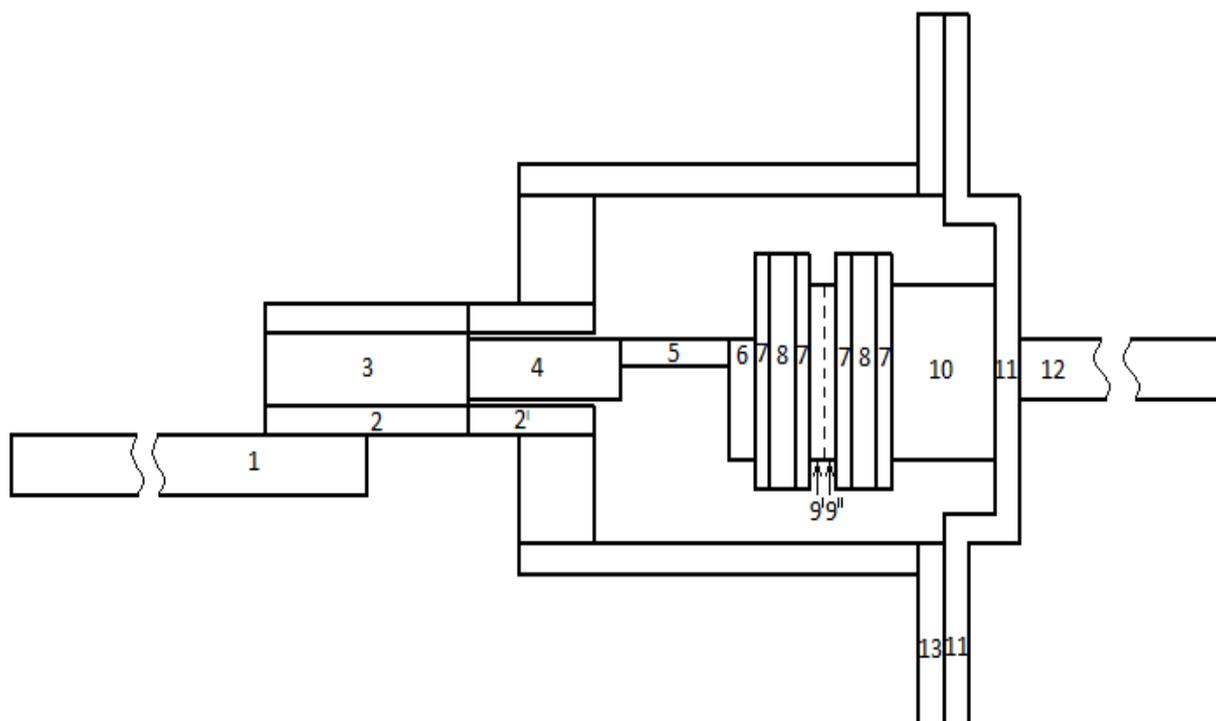


Рисунок 6.8 – Схема расчётной модели конструкции ограничителя напряжения в корпусе КД-9

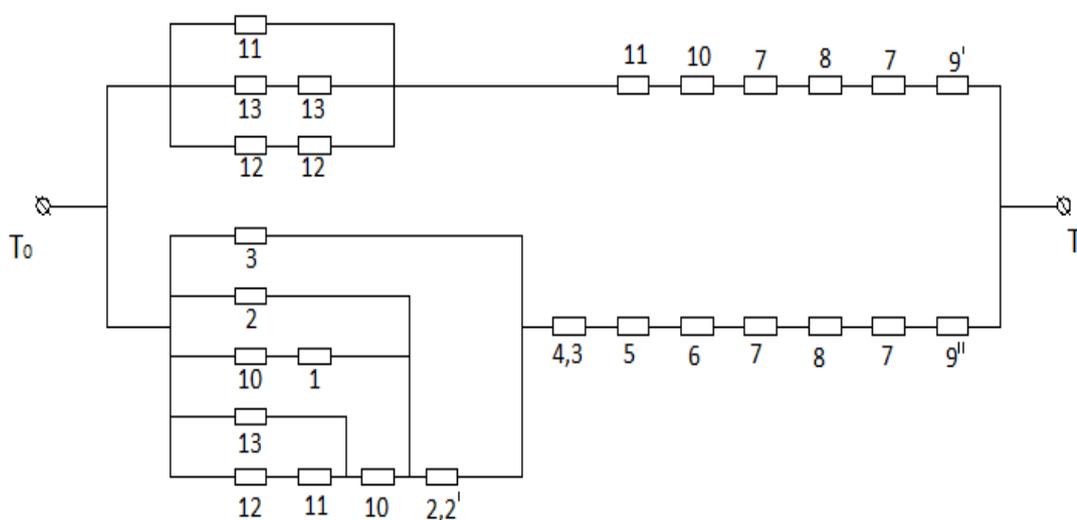


Рисунок 6.9 – Термоэквивалентная схема ограничителя напряжения в корпусе КД-9

Расчёт такой структуры аналитическим способом, т.е. решением системы уравнений нестационарной теплопроводности, представляется чрезвычайно сложным и поэтому неоправданным, в нашем случае, смысла им воспользоваться нет [158].

Вследствие этого, в основу теплофизического расчёта конструкции ограничителя положен упрощённый алгоритм расчёта температурного поля силового диода [159, 160].

Выражение для предельно допустимой импульсной мощности выглядит следующим образом:

$$P_{\text{и.макс}} = \frac{T_{p-n} - T_0}{R_{\theta.\text{и.}} + \frac{R_{\theta}}{Q}}, \quad (6.7)$$

где T_{p-n} – температура $p-n$ -перехода; T_0 – температура окружающей среды; R_{θ} – статическое тепловое сопротивление; $R_{\theta.\text{и.}}$ – импульсное тепловое сопротивление; Q – скважность импульса.

Расчётные значения R_{θ} и $R_{\theta.\text{и.}}$ для импульса прямоугольной $\tau_u = 1$ мс, $Q = 10^4$, $T_0 = 25^\circ\text{C}$ приведены в таблице 6.2, кроме элементов 8, 9', 9'' (термокомпенсационные медные диски, p^+ -, n^+ - слои кремниевой подложки (см. рисунок 6.8)).

Таблица 6.2 – Расчётные значения R_{θ} и $R_{\theta.\text{и.}}$ для прямоугольного импульса

Номер элемент а	1	2	2'	3,4	5	6	7	10	11	12	13	14	15
$R_{\theta}, \frac{^\circ\text{C}}{\text{w}}$	131	21	321	62	24	0,2	0,1	0,6	0,2	490	0,4	38	191
$R_{\theta.\text{и.}}, \frac{^\circ\text{C}}{\text{w}}$	0,5	0,2	1,0	1,5	1,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0	0,2	1,8

Сопротивления элемент – воздух имеют следующие значения:

$$\begin{array}{ll}
 1_0 - 529 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} & 12_0 - 174 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \\
 2_0 - 423 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} & 13_0 - 686 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \\
 3_0 - 63776 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} & 12_0 - 251 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \\
 11_0 - 431 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} & 12_0 - 1717 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}
 \end{array}$$

При оценке конструкции рассматривались различные варианты, поэтому значения сопротивлений элементов, указанных в таблице 6.2, рассчитаны отдельно в зависимости от выбранных материалов теплоотводящих дисков (медь, серебро, сплав МД-40) и площади кристаллов.

1 вариант: диагональ шестигранного кристалла кремния – 3,5 мм, термокомпенсаторы медные толщиной 0,4 мм. Значения тепловых сопротивлений элементов 8, 9', 9'', рисунок 6.9, следующие:

$$\begin{array}{lll}
 R_{\theta 8} = 0,1 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} & R_{\theta 9'} = 0,06 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} & R_{\theta 9''} = 0,34 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \\
 R_{\theta n8} = 0,067 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} & R_{\theta n9'} = 0,04 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} & R_{\theta n9''} = 0,22 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}
 \end{array}$$

Общие тепловые сопротивления:

$$R_{\text{общ}} \approx 100 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \quad R_{\theta n_{\text{общ}}} = 0,244 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

2 вариант: диагональ шестигранного кристалла – 3,5 мм, термокомпенсатор из сплава МД-40 толщиной 0,5 мм. Расчётные значения тепловых сопротивлений:

$$\begin{aligned}
 R_{\theta 8} &= 0,2 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} & R_{\theta 9'} &= 0,06 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} & R_{\theta 9''} &= 0,34 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \\
 R_{\theta n 8} &= 0,1 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} & R_{\theta n 9'} &= 0,04 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} & R_{\theta n 9''} &= 0,22 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \\
 R_{\text{общ}} &\approx 100 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} & R_{\theta n \text{общ}} &= 0,27 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}
 \end{aligned}$$

3 вариант: диагональ шестигранного кристалла – 3,5 мм, термокомпенсатор из серебра толщиной 0,4 мм

$$\begin{aligned}
 R_{\theta 8} &= 0,095 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} & R_{\theta \text{общ}} &\approx 100 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} \\
 R_{\theta n 8} &= 0,064 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} & R_{\theta n \text{общ}} &= 0,241 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}
 \end{aligned}$$

4 вариант: диагональ шестигранного кристалла – 3,1 мм, термокомпенсатор из меди толщиной 0,4 мм

$$\begin{aligned}
 R_{\text{общ}} &\approx 100 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} & R_{\theta n \text{общ}} &= 0,251 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}
 \end{aligned}$$

Результаты расчётов для импульсов прямоугольной и экспоненциальной формы отображены на рисунке 6.10.

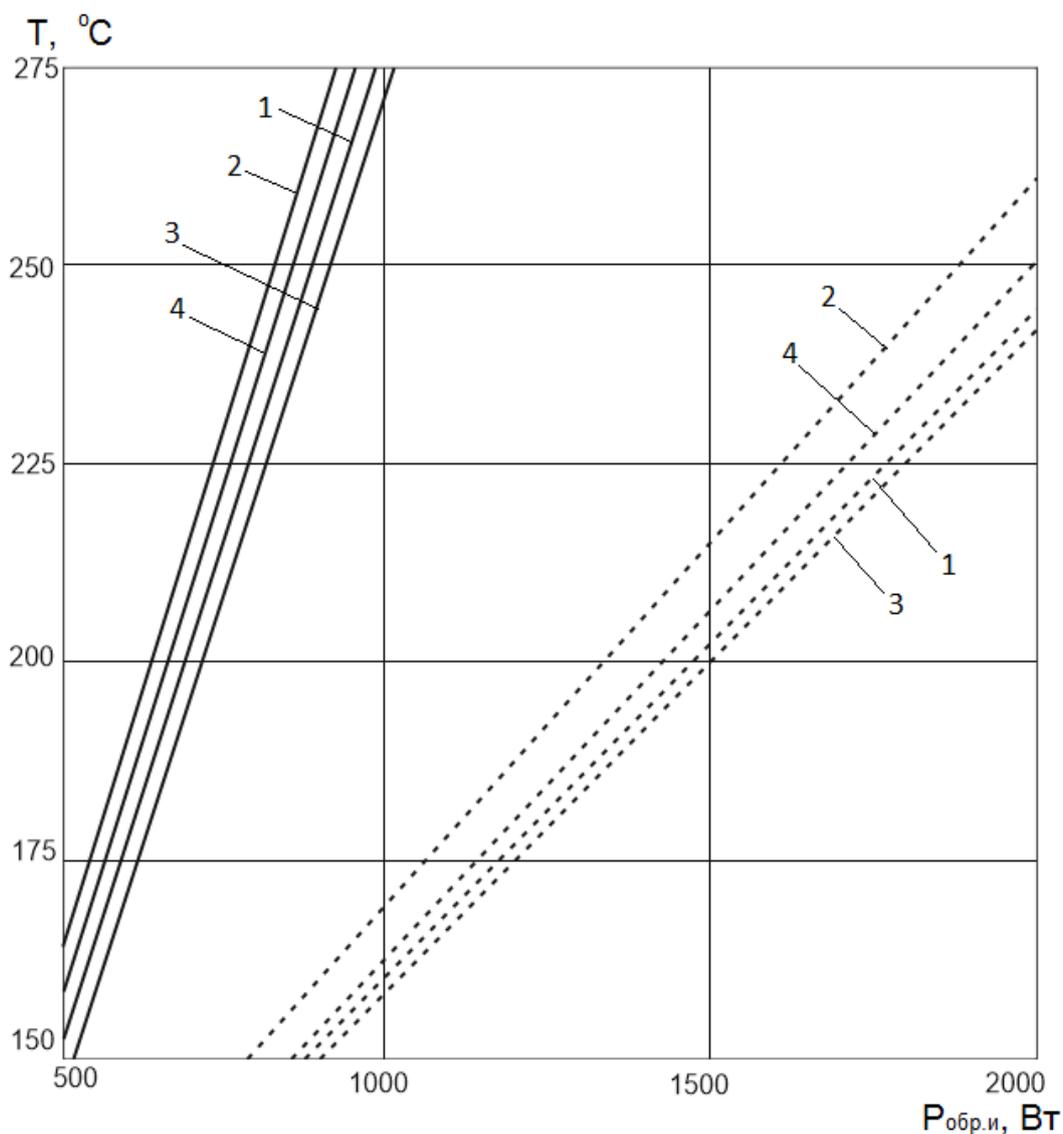


Рисунок 6.10 – Зависимость температуры $p-n$ -перехода (T_{p-n}) от импульсной обратной мощности для различных вариантов конструкции 1,5 кВт-ного ограничителя напряжения в корпусе КД-9: кристаллы, соответственно, с диагоналями 3,5 мм (1, 2, 3) → компенсаторы толщиной 0,4 мм из Си, МД-40, Аг, и 3,1 мм (4) → компенсатор толщиной 0,4 мм из Си; — импульсы прямоугольной формы, --- импульсы экспоненциальной формы

Видно, что при воздействии экспоненциального импульса мощностью 1500 Вт разница T_j для конструкций с кристаллами диаметром 3,5 и 3,1 мм не превышает 6 – 8°C – кривые 1, 4.

Использование термокомпенсаторов из сплава МД-40 вместо Си (или Аг) приводит к увеличению T_j для указанных выше условий на 25°C – кривые 1, 3 и 2.

Однако во всех рассматриваемых случаях предельная температура на p - n -переходе находится на допустимом уровне для кратковременного импульсного воздействия, по данным [148] максимально допустимая температура p - n -перехода для неповторяющегося импульса шириной от 500 мкс до 10 мс равна 500°C .

При воздействии экспоненциального импульса мощностью 1500 Вт разница T_{p-n} для конструкций с кристаллами диаметром 3,5 и 3,1 мм не превышает $\sim 8^{\circ}\text{C}$.

Использование термокомпенсаторов из сплава МД-40, имеющего близкий к кремнию коэффициент термического расширения, вместо Cu (или Ag) приводит к увеличению T_{p-n} для указанных выше условий на 25°C . К тому же, применение термокомпенсаторов из сплава МД-40 оказалось не технологичным. Во всех рассматриваемых случаях предельная температура на p - n -переходе находится на допустимом уровне для кратковременного импульсного воздействия.

6.5 Особенности технологии изготовления низковольтных ограничителей напряжения

Если принципы конструирования ограничителей напряжения распространяются как на высоковольтные, так и на низковольтные ограничители напряжения, то технологии изготовления низковольтных ограничителей напряжения имеют ряд особенностей, принципиально усложняющих их разработку и производство.

В отличие от традиционных p - n -структур таких ППП, как выпрямительные диоды, стабилитроны и т.п., ограничитель напряжения – силовой ППП, для которого важным требованием является по возможности большая глубина залегания p - n -перехода. В связи с этим имеются значительные технологические проблемы изготовления ОН. В основном это касается ограничителей напряжения с напряжением пробоя ниже 15 В и особенно – ниже 7 В: получение глубокого ($x_j > 10$ мкм) p - n -перехода в кремниевой подложке с концентрацией базовой примеси (N_b) на уровне и выше 10^{19} см $^{-3}$, с градиентом концентрации легирующей примеси на уровне $(10^{23} - 10^{24})$ см $^{-4}$ – проблема более чем серьезная.

Достаточно посмотреть на значения основных электрических параметров серий выпускаемых в мире ограничителей напряжения, представленных в Data

Sheets практически всех зарубежных фирм – производителей ограничителей напряжения (Transient Voltage Suppressors, TVS) [161]. Все эти серии начинаются с номинала с напряжением пробоя 6,8 В.

Известна, наверное, единственная фирма, презентующая производство 1,5 кВт-ных ограничителей напряжения с $U_{проб}$ ниже 6,8 В, а именно – ограничителей напряжения с $U_{проб}$ 6,2 В, предназначенных для защиты РЭА с напряжением питания 5 В [162]. Примечательно, что эти ограничители представлены в DATA Sheet вне типового ряда серии ограничителей, начинающихся с номинала 6,8 В, что, очевидно, свидетельствует о неких особенностях технологии их изготовления. Информация об этих технологиях в свободном доступе отсутствует.

Анализ известных способов формирования силовых $p-n$ -структур: диффузия в газовой фазе, диффузия из стеклообразующих плёнок, из твёрдых источников, выявляет определённые ограничения по удовлетворению требований к технологии получения НВ силовых $p-n$ -структур, по обеспечению предельно высокой поверхностной концентрации легирующей примеси и достаточной глубины залегания НВ $p-n$ -переходов. Прогрессивный метод ионного легирования также не обеспечивает требования к $p-n$ -структурам силовых полупроводниковых приборов даже при предельно достижимых в настоящее время энергиях и дозах легирования.

Отечественное производство эпитаксиальных $p-n$ -структур обеспечивает стабильные поставки $p-n$ -структур для ограничителей напряжения с толщиной эпитаксиального слоя (глубиной залегания $p-n$ -перехода) ~ 21 мкм и воспроизводимым напряжением пробоя лишь свыше ~ 15 В.

На основе технологии диффузии мышьяка в вакуированной ампуле изготовлены образцы НВ ограничителей напряжения – диодов с $p-n$ -переходами, залегающими на достаточной для силовых приборов глубине – более 10 мкм, с напряжениями пробоя от 3 В до 15 В, таблица 6.3.

Таблица 6.3 – Результаты изготовления низковольтных диффузионных $p-n$ -структур методом ампульной диффузии мышьяка

$\rho_v,$	$N_x,$	$U_{проб}, В$	$x_j,$	$U_{проб}, В$	$x_j,$	$U_{проб}, В$	$x_j,$
-----------	--------	---------------	--------	---------------	--------	---------------	--------

Ом·см	см ⁻³	t = 8 ч	мкм	t = 24 ч	мкм	t = 48 ч	мкм
0.001	1·10 ²⁰	3.3	8.8	3.6	11.5	4.4	14.2
0.005	2·10 ¹⁹	4.9	10.8	5.4	13.0	6.0	15.2
0.01	1·10 ¹⁹	6.0	11.3	6.5	13.7	7.3	15.5
0.03	3·10 ¹⁸	7.5	11.6	8.4	14.0	10	15.7
0.07	2·10 ¹⁶	–	–	–	–	15	16.0

По-видимому, впервые в мировой практике диффузия As, отличающегося низкой скоростью диффузии, применена для получения силовых глубоких *p-n*-структур. Известные примеры использования As в качестве легирующей примеси относятся к производству полупроводниковых приборов с мелкозалегающими *p-n*-переходами, которые к классу силовых отнести никак нельзя. Вследствие малой скорости диффузии As относительно других донорных легирующих примесей (фосфор, сурьма), получивших более широкое применение в электронной технике, длительность процессов диффузии As в ампуле при получении *p-n*-структур НВ ОН с достаточной глубиной залегания установлена до 48 часов, рисунок 6.11:

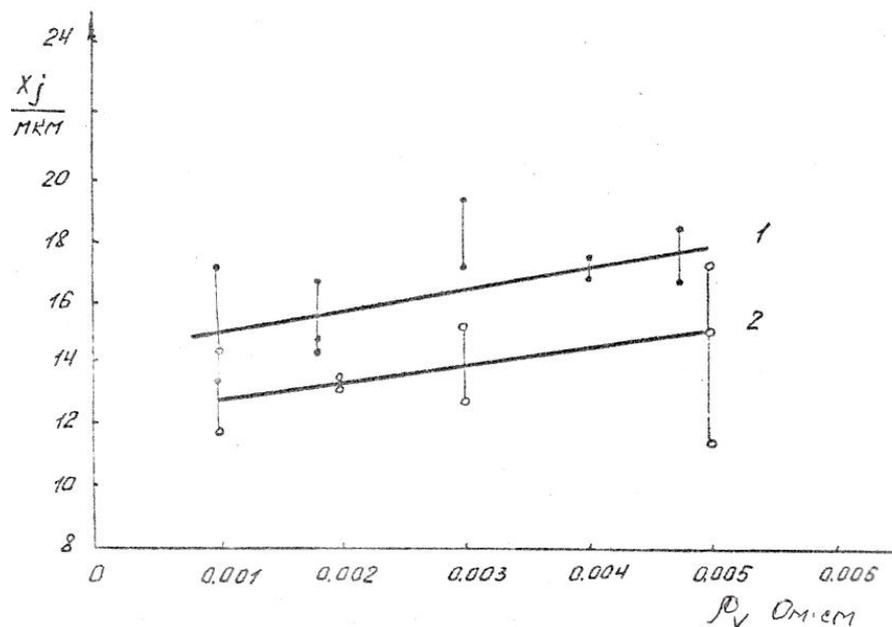


Рисунок 6.11 – Зависимость глубины залегания *p-n*-перехода от удельного сопротивления *p*-кремния и длительного времени диффузии As при температуре 1150°C: 1 – время диффузии 96 ч.; 2 – время диффузии 48 ч.

Для *p-n*-структур с $U_{проб}$ 6,2 В (ограничитель напряжения 2С408А) достигнута глубина залегания *p-n*-перехода ~15 мкм (кремний КДБ0,005, режим

диффузии As: 1150°C, 48 ч.), что оказалось вполне достаточным для обеспечения требуемой импульсной стойкости – не менее 500 тестовых импульсов экспоненциальной формы с длительностью 1 мс при предельно допустимой импульсной мощности 1,5 кВт.

Для *p-n*-структур с $U_{проб}$ 3,9 В (ограничитель напряжения 2С414А с $U_{проб} = 3,9$ В и предельно допустимым импульсным током $I_{огр.и.макс} = 200$ А), изготавливаемых на предельно легированном кремнии КДБ0,001 в режиме диффузии As 1150°C, 48 ч., достигнута глубина залегания *p-n*-перехода ~8 мкм (кремний КДБ0,001), что недостаточно для обеспечения требуемой импульсной стойкости при воздействии $I_{огр.и.макс}$ такой (200 А, $\tau_u = 1$ мс), почти запредельной для 1,5 кВт-ных ОН величины. Положительный результат достигнут при использовании диффузионно – эпитаксиальной конструкции кристалла. Дополнительный эпитаксиальный n^+ -слой, легированный фосфором (концентрация фосфора $\geq 2 \cdot 10^{19} \text{см}^{-3}$) толщиной ~15 мкм осаждался поверх диффузионного слоя на установке УНЭС-2ПК-А тетрахлоридным методом в режиме 1180°C в течение 20 мин.

Нужно отметить, что процесс дополнительного эпитаксиального наращивания в этом режиме снижает $U_{проб}$ НВ *p-n*-структур на ~1,2 В. Объяснение этого эффекта – описанная выше трансформация As из пассивной формы в активную. В результате величина критического импульсного тока ($I_{огр.и.кр.}$) ограничителя 2С414А повышена на ~7 % – с 280 до 300 А, импульсная наработка до отказа при номинальном токе 200 А увеличена с ~300 до ~900 импульсов.

Интересно сопоставить достигнутые результаты по разработке отечественных НВ ОН на основе диффузии As с состоянием в этой области зарубежной техники ЭКБ, с результатами зарубежных разработчиков.

Наиболее близким по достигаемой цели, т.е. получения низковольтных, в том числе с напряжениями пробоя ниже 10 В, кремниевых ограничителей напряжения, является зарубежный способ изготовления низковольтных ограничителей на основе “стабисторного” принципа, основанного на последовательно – параллельном встречном включении прямосмещённых *p-n*-

переходов, рисунок 6.12. Производитель НВ ограничителей, использующий этот принцип, – фирма General Semiconductor Industries, Inc., → серия 1,5 кВт-ных ограничителей напряжения типов от GHV-2 до GHV-16 с симметричной ВАХ и напряжениями пробоя от 1.33 В до 10.7 В [163].

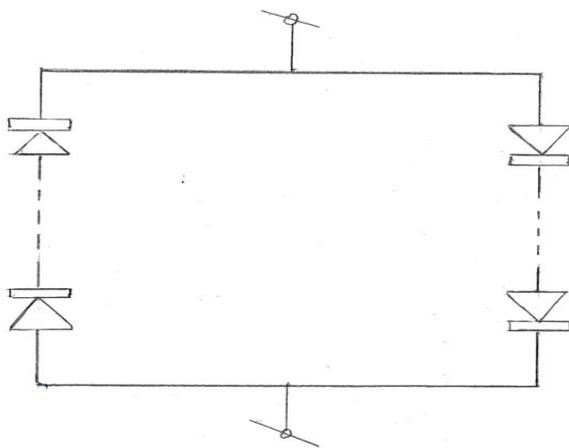


Рисунок 6.12 – Электрическая схема низковольтного ограничителя напряжения серии GHV фирмы General Semiconductor Industries, Inc. [163]

Многокристалльная конструкция ограничителей этого рода представляет собой два, включённых встречным образом “столба” из ряда соединённых последовательно кремниевых $p-n$ -структур, ориентированных в прямом направлении ВАХ. Результирующее напряжение пробоя таких низковольтных ограничителей есть, таким образом, сумма падений прямых напряжений ряда $p-n$ -переходов, смещённых в прямом направлении. Значение величины падения прямого напряжения каждого из таких $p-n$ -переходов находится на уровне от 0,6 В до 0,7 В. Т.е., например, конструкция каждого из “столбов” стабилитронного ограничителя напряжения на основе прямосмещённых кремниевых $p-n$ -структур с напряжением пробоя 3,3 В включает пять диодных кристаллов, конструкция с напряжением пробоя 6,7 В – десять кристаллов. Два встречно включённых “столба” – вдвое большее количество кристаллов.

Идентичный принцип используется отечественными производителями стабилитронов (АО «НЗПП с ОКБ», г.Новосибирск) для изготовления сверхнизковольтных стабилитронов (стабилитронов) с напряжениями стабилизации

0.7 В, 1.3 В, 1.9 В – стабисторы типов 2С107А (одна *p-n*-структура), 2С113А (две *p-n*-структуры), 2С119А (три *p-n*-структуры).

Помимо таких “особенностей” конструкции и технологии изготовления мощных низковольтных ограничителей напряжения на основе способа последовательной сборки кристаллов с прямосмещёнными *p-n*-переходами (Transient Voltage Suppressors GHV-2÷GHV-16 [163]) как многокристалльность конструкции, т.е. высокая себестоимость прибора и низкая его эксплуатационная надёжность, быстродействие ограничителей напряжения типа GHV, характеризуемое временем включения $t_{вкл} \approx 10^{-8}$ сек, также значительно уступает быстродействию однокристалльных ограничителей, работающих на эффекте обратимого пробоя *p-n*-перехода, время включения которых $t_{вкл} \leq 10^{-12}$ сек, что, с точки зрения эффективности защиты электронного оборудования от импульсных электрических перегрузок, имеет весьма существенное значение.

В таблице 6.4 приведены результаты сравнительных исследований образцов ограничителей напряжения с напряжениями пробоя 3,9 В, 6,2 В [142, 145], изготовленных методом диффузии As, и образцов аналогов – ограничителей напряжения GHV-6, GHV-8 фирмы General Semiconductor Industries, Inc. [163], свидетельствующие о значительном функциональном превосходстве разработанных НВ ОН по сравнению с зарубежными аналогами, в основу конструкции которых положен “стабисторный” принцип.

Таблица 6.4 – Значения основных функциональных параметров образцов ограничителей напряжения GHV-6, GHV-8 и аналогичных по напряжению пробоя ограничителей напряжения, изготовленных диффузией мышьяка

Прибор	$U_{проб}$, В	$I_{проб}$, мА	$U_{огр.ш}$, В	$I_{огр.ш}$, А	$K_{огр.ш}$	$I_{и.кр.}$, А	$t_{вкл}$, с (расчёт)
GHV-2	4,0	10	15*	100*	3,7	-	10^{-8}
2С414А	3,9	1	7,5	200	1,5	350	10^{-12}
GHV-8	5,4	10	18*	100*	3,3	150	10^{-8}
2С408А	6,2	10	8,5	150	1,3	210	10^{-12}

На рисунке 6.12 представлены экспериментальные импульсные ВАХ образцов зарубежных ограничителей напряжения серии GHV и низковольтных ограничителей напряжения 2С414А, 2С408А:

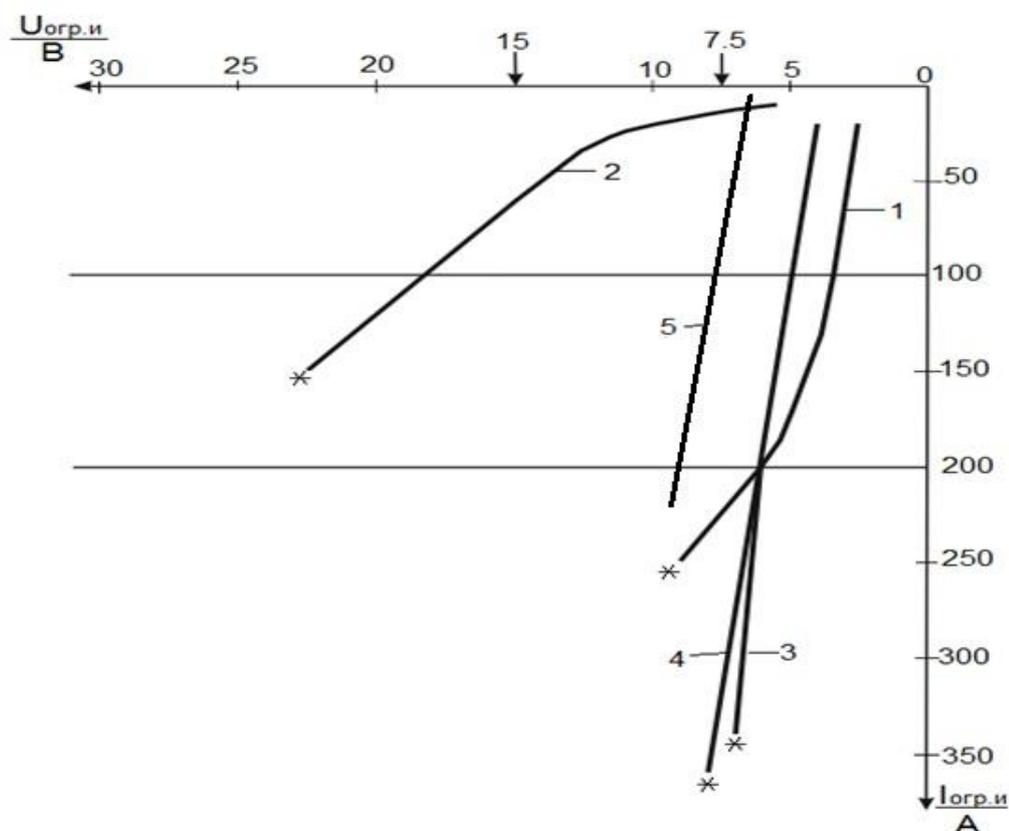


Рисунок 6.12 – Импульсные ВАХ НВ ОН: 1, 2 → TVS GHV-2, GHV-8; 3, 4 → НВ ОН 2С414А (диффузия As), 2С414А (диффузия + эпитаксия); 5 – НВ ОН 2С408А; * → режим отказа прибора.

6.6 Исследование и внедрение низковольтных ограничителей напряжения в производство

Результаты разработки и исследования НВ ограничителей напряжения, изготовленных на основе высококонцентрационной диффузии As в эвакуированном реакторе обеспечили проведение серии НИОКР по разработке и внедрению в серийное производство серии НВ ограничителей напряжения в корпусах для навесного и поверхностного монтажа, а также и безкорпусных, с напряжениями пробоя в диапазоне (3,3÷15) В с импульсной мощностью 0,5 кВт, 1,5 кВт [142-147, 164].

На рисунке 6.17 представлены образцы ограничителей напряжения в корпусах для навесного и поверхностного монтажа (SMD), разработанных по Государственной Программе «Развитие оборонно-промышленного комплекса 2017», ОКР «Вольт-И9» [164]:

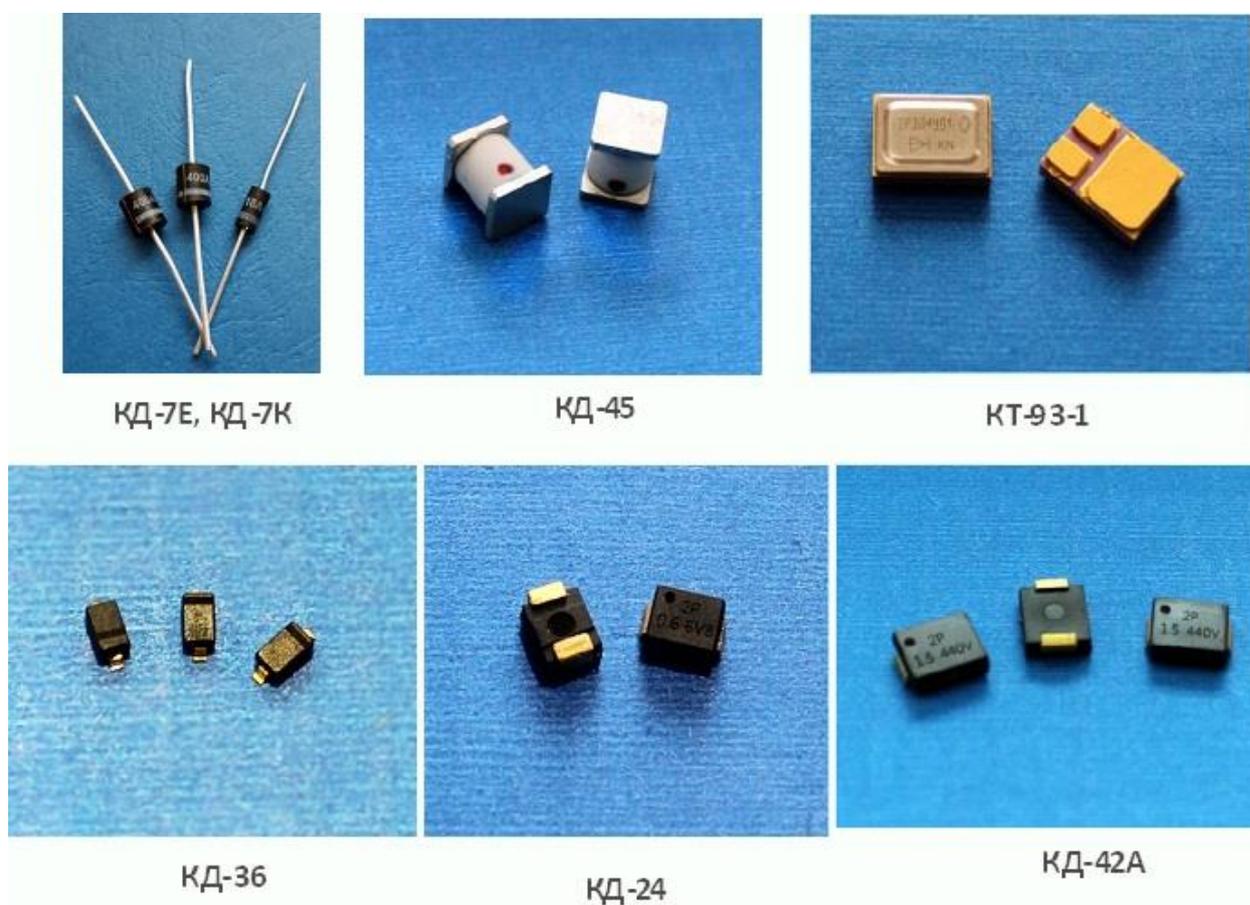


Рисунок 6.17 – Образцы ограничителей напряжения в корпусах для навесного и поверхностного монтажа (SMD)

6.7 Преобразователи напряжения на основе планарных $p-n$ -переходов с туннельным пробоем

Эффект существенной нелинейной зависимости напряжения пробоя ($U_{проб}$) $p-n$ -переходов с туннельным механизмом пробоя от величины их площади S_{p-n} (см. рисунки 2.32, 3.7) может быть использован для создания нового вида полупроводниковых приборов с отрицательным дифференциальным сопротивлением [165].

В области нелинейной зависимости $U_{проб}$ от S_{p-n} любому изменению площади $p-n$ -перехода (ΔS_{p-n}) соответствует определенное изменение напряжения пробоя

($\Delta U_{\text{проб}}$, рисунок 2.33). Причем для области преобладающего туннельного пробоя конечное значение $U_{\text{проб}}$, соответствующее увеличению площади p - n -перехода от значения $S_{p-n.1}$ до значения $S_{p-n} = S_{p-n.1} + S_{p-n.2}$, записывается приближенным выражением (2.24). Таким образом, если существует эффект изменения напряжения пробоя p - n -перехода за счёт увеличения его площади, можно представить себе возможность создания конструкции преобразователя напряжения, основанной на этом эффекте. На рисунке 6.13 представлен пример такой конструкции [166]:

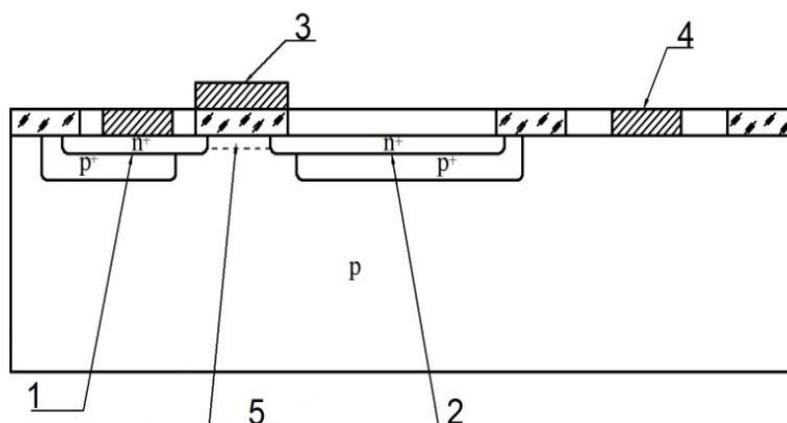


Рисунок 6.13 – Преобразователь напряжения, управляемый МОП – системой: 1, 2 – p - n -переходы с туннельным пробоем; 3 – МОП система; 4 – электрод к кремниевой подложке; 5 – проводящий канал

В конструкции прибора на рисунке 6.13 изменение площади p - n -перехода 1 достигается подключением к нему соседнего p - n -перехода 2 с помощью управляющей МОП-системы 3, на полевой электрод которой подаётся напряжение с величиной и полярностью, необходимыми для образования проводящего канала 5 в слабо легированной (высокоомной) p -кремниевой подложке между рассматриваемыми p - n -переходами 1, 2. В результате происходит трансформация p - n -перехода 1 в p - n -переход с интегральной площадью $S_{p-n} = S_{p-n.1} + S_{p-n.2}$ и соответствующее дискретное изменение напряжения ($\Delta U_{\text{проб}}$) на выходе прибора от значения $U_{\text{проб}}(S_{p-n.1})$ до значения $U_{\text{проб}}(S_{p-n.1} + S_{p-n.2})$ (см. рисунок 2.32).

Реализован экспериментальный вариант конструкции устройства (рисунок 6.13), изготовленного на основе кремния p -типа проводимости с концентрацией

легирующей примести (бора) $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (ρ_v 20 Ом·см). Площади p^+-n^+ -переходов 1, 2 составляли соответственно $2,7 \cdot 10^{-5}$ и $5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$. то-есть значительно отличались друг от друга, что было сделано с целью получения заметной разницы напряжений на выходе прибора.

Для контактирования с электродами 3, 4 использовалась зондовая установка «Зонд-А-4М». Управляющее синусоидальное напряжение с амплитудой $\sim 20 \text{ В}$ на полевой электрод МОП-системы подавали от звукового генератора ГЗ-33. Исследовались обратные ветви ВАХ образцов при постоянном обратном токе 3 мА. Наблюдались обратные ВАХ, соответствующие переключению устройства из рабочего состояния (а), определяемого включением p^+-n^+ -перехода 1 в рабочее состояние (б), определяемое включением результирующего p^+-n^+ -перехода, составленного из связанных проводящим каналом 5 p^+-n^+ -переходов 1 и 2, рисунок 6.14:

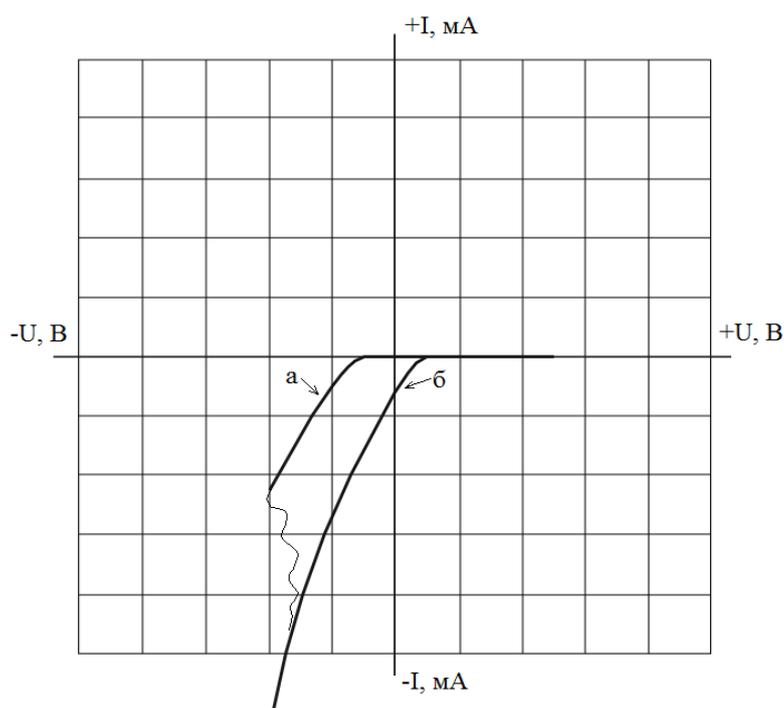


Рисунок 6.14 – Вольт-амперная характеристика преобразователя напряжения на основе планарных $p-n$ -переходов с туннельным пробоем в момент переключения: а – начальное положение обратной ветви ВАХ; б – конечное положение обратной ветви ВАХ

Первому и второму указанным рабочим состояниям устройства соответствовали напряжения на выходе $\sim 12,2$ и ~ 10 В при обратном токе 3 мА. Величина полученной разницы напряжений ограничения ($\sim 2,2$ В) в первом и втором рабочих состояниях исследуемого устройства хорошо согласуется с предварительными экспериментальными данными для p^+-n^+ -переходов с туннельным пробоем с площадями соответственно $2,7 \cdot 10^{-5}$ см² и $5 \cdot 10^{-3}$ см², изготовленных на кремнии p -типа проводимости с концентрацией легирующей примеси $1,1 \cdot 10^{20}$ см⁻³. В то же время туннельным p^+-n^+ -переходам с такими площадями должны соответствовать напряжения пробоя $\sim 4,3$ и $\sim 2,3$ В.

Полученное расхождение между абсолютными значениями $U_{проб}$ p^+-n^+ -переходов 1, 2 реализованного варианта конструкции экспериментального представленного выше устройства (рисунок 6.13) и экспериментальных туннельных p^+-n^+ -переходов с аналогичными размерами объясняется наличием дополнительной составляющей падения напряжения на значительном по величине сопротивлении растекания высокоомной базы и на чрезмерно высоком контактном сопротивлении между электродом 4 и высокоомной (20 Ом·см) исходной кремниевой пластиной, к подавлению которого специальных мер принято не было. Пути минимизации контактного сопротивления общеизвестны. Отметим также, что наличие туннельного механизма пробоя у рабочих p^+-n^+ -переходов 1, 2 экспериментальных образцов устройства (см. рисунок 6.13) подтверждается характерным относительно плавным ходом соответствующих им обратных ВАХ с отрицательным сопротивлением (рисунок 6.14).

Критическая величина напряжения на управляющем полевым электроде ~ 20 В – также хорошо согласуется с теоретическим значением напряжения инверсии p -области 5 (рисунок 5.13) с исходной концентрацией $7 \cdot 10^{14}$ см⁻³ для принятых размеров канала (14 и 150 мкм) и толщины ($\sim 0,45$ мкм) оксида кремния под полевым электродом 3 [55].

Одним из возможных вариантов конструкции кристалла преобразователя напряжения на основе p^+-n^+ -переходов с туннельным механизмом пробоя может быть устройство, в котором управление смыканием рабочих p^+-n^+ -переходов 1, 2

осуществляется не с помощью МОП – системы, а посредством управляющего n^+ - p -перехода 3 с лавинным механизмом пробоя, рисунок 6.15:

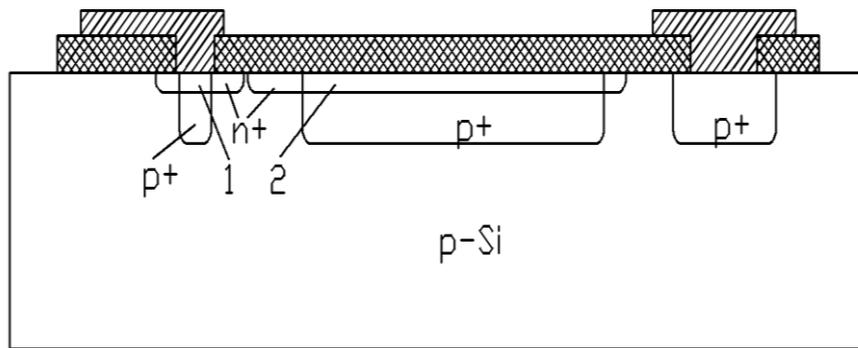


Рисунок 6.15 – Преобразователь напряжения, управляемый n^+ - p -переходом с лавинным пробоем: 1, 2 – n^+ - p^+ -переходы с туннельным пробоем

В данном случае смыкание p^+ - n^+ -переходов происходит посредством расширения области объёмного пространственного заряда (ОПЗ) управляющего n^+ - p -перехода при подаче на него напряжения обратного смещения.

На рисунке 6.16 представлены ВАХ экспериментальных несимметричных (а) и симметричных (б) образцов преобразователей напряжения, управляемых n^+ - p -переходом с лавинным пробоем. Симметричность обеспечивается встречным включением двух таких структур.

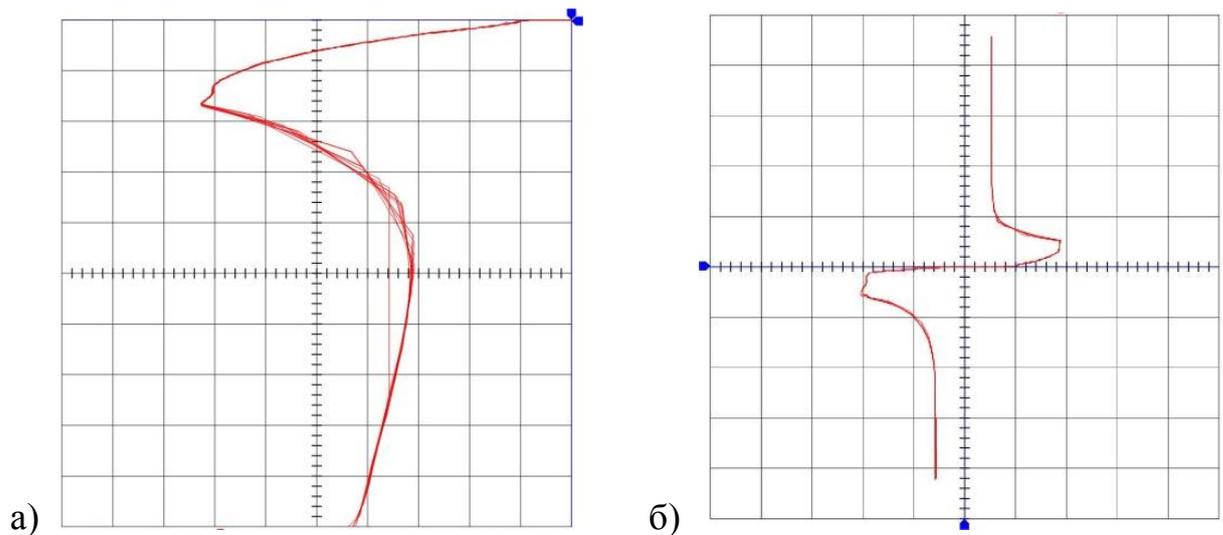


Рисунок 6.16 – Вольт-амперные характеристики преобразователей напряжения на основе планарных p - n -переходов с туннельным пробоем, управляемых p - n -переходом с лавинным пробоем: а, б – несимметричный и симметричный варианты

Приборы, использующие эффект нелинейной зависимости напряжения пробоя туннельных *p-n*-переходов от их площади, по-видимому, могут найти применение в микроэлектронных устройствах в качестве программируемых переключающих элементов или ограничителей напряжения с отрицательным сопротивлением, управляемых МОП-системой или *p-n*-переходом с лавинным пробоем. Очевидно также, что изменением размеров рабочих *p-n*-переходов, концентраций примесей в *p*- и *n*-областях представленных устройств преобразователей напряжения на основе *p-n*-переходов с туннельным пробоем (см. рисунки 5.16, 4.18), размеров областей, разделяющих рабочие *p-n*-переходы, толщины диэлектрика под управляющим полевым электродом, можно в широких пределах регулировать абсолютные значения и разницу между ними напряжений ограничения на выходе устройства.

В электронной технике наиболее востребованы низковольтные ОН, с напряжениями пробоя менее 7 В, необходимые для защиты микроэлектронных РЭУ с низкими уровнями напряжения питания. Т.е. именно те ОН, для которых изготовление *p-n*-структур может успешно проводиться по технологии высококонцентрационной диффузии As в эвакуированной ампуле.

Таким образом, можно заключить, что, так как для силовых приборов защиты – кремниевых ограничителей напряжения надёжность прямо зависит от глубины залегания *p-n*-перехода [150], результаты разработки диффузионных *p-n*-структур с туннельным и смешанным механизмами пробоя, полученных высококонцентрационной диффузией As в сильнолегированный кремний *p*-типа проводимости, по-видимому, будут востребованы ещё достаточно долгое время.

Выводы к главе 6

1. Исследованы физические аспекты работы силового полупроводникового прибора – ограничителя напряжения, определяющие эффективность его функционирования и надёжность. На основании результатов исследования разработаны основные принципы конструирования и промышленной

технологии изготовления ограничителей напряжения, в т.ч. – низковольтных на основе p - n -структур с туннельным и смешанным механизмами пробоя.

2. Впервые в мировой практике диффузия As, отличающегося относительно низким коэффициентом диффузии, применена для получения глубоких p - n -структур, лежащих в основе конструкции силовых приборов защиты – кремниевых ограничителей напряжения.

3. 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, создающего структурные нарушения решётки кремния в области p - n -перехода, что и приводит к деградации его характеристик.

4. Показано, что конструкции кристаллов низковольтных ОН с напряжениями пробоя в области преобладающего туннельного механизма пробоя ($U_{проб.} < 5$ В) целесообразно усиливать за счёт нанесения поверх диффузионного n^+ -слоя достаточно толстого n^+ - эпитаксиального слоя.

5. Основные принципы конструирования и технологии изготовления ограничителей напряжения реализованы в разработках (НИОКР) ряда низковольтных ограничителей напряжения с $U_{проб.}$ (3,9-15) В и импульсной мощностью 0,3 кВт; 0,5 кВт; 1,5 кВт. На основе технологии диффузии As разработаны и внедрены в серийное производство АО «НЗПП с ОКБ» 37 типоминералов НВ ограничителей напряжения в корпусах для навесного и поверхностного монтажа.

6. Показано, что НВ ограничители напряжения с $U_{проб.}$ 3,9 В (2С414А), 6,2 В (2С408А), изготовленные по разработанной технологии диффузии As, отличаются от зарубежных аналогов серии GHV ф. G.S.I., Inc., USA, значительным функциональным превосходством.

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

8. Предложено выявленный эффект существенной нелинейной зависимости напряжения пробоя ($U_{проб}$) p - n -переходов с туннельным механизмом пробоя от величины их площади (S_{p-n}) применить для создания нового типа полупроводниковых приборов – преобразователей напряжения с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в диссертации результаты охватывают полный цикл работ по достижению поставленной Цели “разработка и исследование низковольтных диффузионных *p-n*-структур с туннельным и смешанным механизмами пробоя, разработка и внедрение в серийное производство НВ стабилитронов, НВ термокомпенсированных стабилитронов и НВ ограничителей напряжения” – от анализа информации из отечественных и зарубежных источников по наличию проблем в области разработки диффузионных технологий получения НВ *p-n*-структур и производства планарных НВ полупроводниковых приборов, до разработки промышленной технологии получения НВ планарных *p-n*-структур с туннельным и смешанным механизмами пробоя на основе идеи высококонцентрационной диффузии мышьяка в сильнолегированный кремний из неограниченного источника в условиях эвакуированной ампулы; от исследования диффузионных НВ *p-n*-структур и конструктивно-технологических факторов, определяющих их электрофизические параметры, до создания способов управления с помощью этих факторов параметрами НВ диффузионных *p-n*-структур, создания промышленных технологий и разработки на основе таких структур высоконадёжных радиационно-стойких НВ стабилитронов, НВ термокомпенсированных стабилитронов, в т.ч. прецизионных и ультра-прецизионных термокомпенсированных, и НВ ограничителей напряжения, и внедрения их в серийное производство.

Совокупность перечисленных методологических подходов позволила достоверно выявить, в частности, следующие электро-физические особенности НВ диффузионных *p-n*-структур и технологические эффекты:

- установлено соответствие характера зависимости одного из основных электрических параметров *p-n*-структур – дифференциального сопротивления обратной ветви ВАХ (r_d) от напряжения пробоя ($U_{проб}$) разработанных диффузионных НВ *p-n*-структур – $r_d(U_{проб})$ и соответствующих зависимостей для сплавных *p-n*-переходов, что свидетельствует об идентичности их электрофизических характеристик и позволило провести замещающие разработки

НВ стабилитронов, а также создать новую технологическую базу для разработки термокомпенсированных стабилитронов и разработки новых в отечественной практике типов полупроводниковых приборов – НВ ограничителей напряжения;

- выявлен эффект влияния на электрические параметры НВ диффузионных *p-n*-структур НТ отжигов, с помощью которых возможна тонкая корректировка величины их $U_{проб}$, причём, как в сторону увеличения, так и понижения, как в пластинах, так и загерметизированных в стеклянный корпус. Дано объяснение этого эффекта с привлечением известных данных о возможных двух состояниях диффундировавших в кристаллическую решётку кремния атомов As – ионизированном активном и пассивном в виде метастабильных кластеров. Эффект обратимой трансформации As из пассивной в активную формы нашёл применение при разработке и производстве НВ стабилитронов, прецизионных НВ стабилитронов с разбросом напряжения стабилизации $\pm 2\%$ и прецизионных термокомпенсированных стабилитронов, для которых фактический разброс напряжения стабилизации должен составлять не более $\pm 0,5\%$;

- экспериментальным путём выявлена и объяснена на основе известных теоретических представлений регулярная зависимость напряжения пробоя диффузионных *p-n*-структур в области туннельного и смешанного механизмов пробоя от площади *p-n*-перехода. Фактор этой зависимости использован при разработке НВС и НВ ОН с $U_{ст} / U_{проб}$ менее 5 В. Зависимость напряжения пробоя *p-n*-структур в области туннельного и смешанного механизмов пробоя от площади *p-n*-перехода использована также в предложенном и проверенном на экспериментальных образцах оригинальном типе преобразователей напряжения на основе *p-n*-структур с туннельным пробоем, управляемых либо МОП системой, либо пространственным зарядом (ОПЗ) встроенного высоковольтного *p-n*-перехода.

Достоверность полученных результатов подтверждается оригинальными разработками и внедрением в серийное производство ряда новых типов низковольтных стабилитронов, термокомпенсированных стабилитронов, в т.ч. прецизионных и ультра-прецизионных, и ограничителей напряжения.

В результате разработана планарная технология получения НВ диффузионных *p-n*-структур с электрическими характеристиками, идентичными характеристикам “резких” НВ сплавных *p-n*-структур, т.е. технология, обеспечивающая полное замещение технологии получения НВ *p-n*-структур сплавлением Al в Si.

Вместе с тем, технология НВ диффузионных *p-n*-переходов предоставляет новые в сравнении со сплавной технологией перспективные возможности. В частности, это – возможность управления параметрами *p-n*-переходов за счёт величины их площади и тонкой корректировки параметров посредством НТ отжигов.

Разработаны промышленные технологии изготовления планарно-диффузионных НВ стабилитронов, НВ термокомпенсированных стабилитронов, НВ ограничителей напряжения.

Разработаны и внедрены в серийное производство ряд серий НВ стабилитронов, НВ термокомпенсированных стабилитронов, НВ ограничителей напряжения.

Результаты исследований и разработанные в диссертации технологии использованы в 34 НИОКР, выполненных в период с 1974 г. по 2020 г. Все эти разработки носили пионерский и оригинальный характер [160-163], что позволило АО «НЗПП с ОКБ» занять лидирующее, а по многим позициям – монопольное положение в этой области отечественного полупроводникового приборостроения: производстве стабилитронов и ограничителей напряжения, основной объём производства которых в настоящее время представляют низковольтные типономиналы, что соответствует определяющему тренду развития ЭКБ для электронной техники.

Можно заключить также, что если для низковольтных стабилитронов (НВС), разработанных и выпускаемых в настоящее время на основе технологии высококонцентрационной диффузии As, в будущем может просматриваться переход на технологию ионного легирования либо на технологию эпитаксиального наращивания, то оригинальная технология глубокой диффузии As в

эвакуированной ампуле по настоящее время и ещё длительное время останется наиболее эффективным и экономически целесообразным способом получения кремниевых низковольтных ограничителей напряжения.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВАХ – вольт-амперная характеристика p-n-перехода

ESD – электростатический разряд

ЭМИ – электромагнитный импульс

НВ – низковольтный

ВВ – высоковольтный

НТ – низкотемпературный

ВТ – высокотемпературный

ППП – полупроводниковый прибор

ИС – интегральная схема

РЭУ – радиоэлектронное устройство

РЭА – радиоэлектронная аппаратура

РТ – ракетная техника

РКТ – ракетно-космическая техника

НВС – низковольтный стабилитрон

ВВС – высоковольтный стабилитрон

ТКС – термокомпенсированный стабилитрон

НВ ОН – низковольтный ограничитель напряжения

ВВ ОН – высоковольтный ограничитель напряжения

E_g – ширина запрещённой зоны p-n-перехода (эВ)

W_{p-n} – ширина области пространственного заряда (ОПЗ) (Å)

N_d, N_a – концентрации донорной и акцепторной легирующих примесей

N_0 – концентрация легирующей примеси в базе

N_s – поверхностная концентрация

ρ_v, ρ_s – удельное и поверхностное сопротивления

x_j – глубина залегания p-n-перехода

S_{p-n} – площадь p-n-перехода

$N_I (N_{eff})$ – эффективная концентрация

α – градиент концентрации легирующей примеси

U_{Bi} – внутренний барьерный потенциал

$U_{Br} (U_{проб})$ – напряжение пробоя
 $U_r (U_{обр})$ – обратное напряжение
 $U_{ст}$ – напряжение стабилизации
 $U_{пр}$ – прямое падение напряжения
 $\Delta U_{ст}$ – разброс напряжения стабилизации
 $I_{ст}$ – ток стабилизации
 Q – показатель качества р-п-перехода ($Q = r_{ст} / r_d$)
 $r_{ст}$ – статическое сопротивление р-п-перехода
 $r_z (r_d)$ – дифференциальное (динамическое) сопротивление р-п-перехода
 J_{p-n} – плотность тока через р-п-переход
 U_{Ba}, U_{Bt} – напряжения пробоя лавинного, туннельного
 $I_R (I_{обр})$ – обратный ток
 I_{gr} – генерационно-рекомбинационный ток
 $r_z (r_d)$ – дифференциальное сопротивление
 $\beta (\alpha U_{проб})$ – температурный коэффициент напряжения пробоя (стабилизации)
 Υ – относительный температурный коэффициент ширины запрещённой зоны
 \mathcal{E}_m – максимальная напряжённость поля в р-п-переходе
 $\alpha_{p-n} (\Delta N_{p-n})$ – градиент концентрации легирующей примеси в р-п-переходе
 x_j – глубина залегания р-п-перехода
 $W_{б}$ – толщина базового слоя
 R_s – сопротивление растекания ($R_s = \rho_v \cdot W_{б} / S_{p-n}$)
 C_{tot} – общая ёмкость
 D_p, D_n – коэффициенты диффузии дырок, электронов
 n_i – собственная концентрация примеси
 q – заряд электрона
 ϵ, ϵ_0 – диэлектрические постоянные
 \hbar – постоянная Планка
 ℓ – длина свободного пробега
 τ_n, τ_p – времена жизни электрона, дырки
 μ_n, μ_p – подвижности электронов, дырок

f_T – вероятность туннелирования электронов сквозь потенциальный барьер
 J_T – плотность туннельного тока
 b – постоянная решётки полупроводника
 $\hbar\omega$ – энергия фонона
 m^* – эффективная масса электрона.
 M_n, M_p - коэффициенты умножения для электронов и дырок
 α_n, α_p - коэффициенты ионизации для электронов и дырок
 v_d – дрейфовая скорость электронов
 v_n – вероятность ионизации электронами
 $\alpha U_{ст}$ – температурный коэффициент напряжения стабилизации
 $\alpha U_{пр}$ – температурный коэффициент падения прямого напряжения
 $\delta U_{ст.}$ – временная нестабильность напряжения стабилизации
 $\Delta U_{л.ст.}$ – нелинейность температурной зависимости напряжения стабилизации
 $U_{ш}$ – размах низкочастотных шумов при заданном токе стабилизации
 $K_{огр.и.}$ – коэффициент ограничения импульса перегрузки
 $U_{огр.и.}$ – импульсное напряжение ограничения
 τ_i – длительность импульса перенапряжения
 $t_{вкл}$ – время включения ограничителя напряжения
 Si^* – поликремний

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Taylor T.C. Crack-free alloyed junctions in silicon using pure aluminium / T.C. Taylor // J.Appl. Phys. – 1958 – V.29, № .5 – P.856 - 866.
2. Аладинский В.К. Пробой в узких кремниевых р-п-переходах / В.К. Аладинский // Радиотехника и электроника. – 1965. – Т.10, № 1. – С.104 - 111.
3. Аладинский В.К. Пробой в узких германиевых р-п-переходах / В.К. Аладинский // Электронная техника. – Сер.2 Полупроводниковые приборы. – 1967. – № 5. – С.87 - 97.
4. Аладинский В.К. О влиянии форм пробоя на ВЧ проводимость р-п-переходов / В.К. Аладинский, П.Г. Градинаров // Физика и техника полупроводников. – 1970. – Т.4, № 7. – С.1328 - 1329.
5. Sze S.M. Avalanche Breakdown Voltages of Abrupt and Linearly Graded p-n-junctions in Ge, Si, GaAs and GaP / S.M. Sze, G. Gibbons // J.Appl. Phys. Lett. – 1966. – V.8. – P.111.
6. Tuagi M.S. Zener and Avalanche Breacdown in Silicon Alloyed p-n-junctions / M.S. Tuagi // Solid State Electron. – 1968. – № 11. – P.99 - 115.
7. Weinerth H. Silicon diode breakdown in the transition range between avalanche effect and field emission / H. Weinerth // Solid-State Electron. – 1967. – № 10. – P.1053 - 1062.
8. Chynoweth A.G. Internal field emission / A.G. Chynoweth // Progress in semiconductors. – 1960, №4. – P.95 -123.
9. Thurmond C.D. The standart thermodynamic functions for the formation of electrons and holes in Ge, Si, GaAS and GaP / J. Electrochem. Soc. – 1975. – № 127. – P.1113 - 1114.
10. Tuagi M.S. Zener and avalanche breakdown in silicon alloyed p-n-junctions / M.S. Tuagi // Solid – state Electron. – 1968. – №11. – P.99 -115.
11. Haitz R. Mechanisms contributing to the noise pulse rate of avalanche diodes / R. Haitz // J. Appl. Phys. – 1965, №36. – P.3123-3131.
12. Тагер А.С. Лавинно-пролётные диоды и их применение в технике СВЧ / А.С. Тагер, В.М. Вальд-Перлов. – М.: «Сов. Радио», 1968. – 480 с.

13. Сущик А.С. Исследование возможности улучшения характеристик низковольтных стабилитронов. / А.С. Сущик, А.Б. Юханов // Электронная техника. – Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1971. – №3. – С.58 - 63.
14. Трутко А.Ф. Методы расчёта транзисторов / А.Ф. Трутко. – М.: Энергия, 1971. – 272 с.
15. Мицухико К. Зависимость напряжения зенеровского пробоя в сверхрезком р-п-переходе от распределения примеси / К. Мицухико. С. Адзума, И. Тэцуро // Дэнси гаккай ромбунси. – 1968. – т.51-с. – №8. – С.385 - 386.
16. Патент Фр., кл. НО1L 7/36, № 360746. Заявл. 28.06.68, опубл. 21.09.71. Тир Ж. Полупроводниковый прибор.
17. Пат. Фр. кл. НО1L 7/36, № 1557080. Заявл. 14.12.67, опубл. 06.01.69. Тир Ж. Способ изготовления диодов с резким р-п-переходом.
18. Патент РФ 2 023 769 С1. Заявл. 1991.12.10, опубл. 1994 11.03. Добровенский В.В. Способ получения однородно-легированного кремния.
19. Thurmond C.D. The standart thermodynamic functions for the formation of electrons and holes in Ge, Si, GaAS and GaP / C.D. Thurmond // J. Electrochem. Soc. – 1975. – № 127. – P.1113 - 1114.
20. Chiu R.N. A diffusion model for arsenic in silicon. / R.N Chiu., H.N. Ghosh // IBM. J.Res. Develop. – 1971. – V.15, № 6. –P.472 - 476.
21. Fuller C.S. Diffusion of donors and acceptors in silicon / C.S. Fuller, J.A. Ditzenberger // J.Appl. Phys. – 1956. – V.27, – № 8. – P.533-544.
22. Ghosh H.N. An arsenic emitter structure for high-performance silicon transistors/ H.N. Ghosh [и др.] // IBM J. Res. Develop. – 1971. – V.15, №6. – P.457-463.
23. Основы технологии кремниевых интегральных схем. Окисление, диффузия, эпитаксия / Пер. с англ. под ред. Р. Бургера и Р.М. Донована. – М.: Мир, 1969. – 451 с.
24. Joshy M.L. Precipitates of phosphor and arsenic in silicon / M.L. Joshy // J. Electrochemical Soc. – 1966. – V.113, №1. – P.49 - 53.
25. Разработка маломощных стабилитронов на 3–7 Вольт. – Отчёт по теме «Полюс». – Москва, АО «САПФИР». – 1963. – 58 с. – Инв. № 62.

26. Исследование метода двойной диффузии для получения обратного градиента концентрации в р-п-переходах. – Отчёт по теме «Интерес». – Москва, АО «САПФИР». – 1965. – 14 с.
27. Разработка методов получения импульсных стабилитронов с напряжением пробоя 6 – 7 В и исследование возможности снижения напряжения пробоя до 3 Вольт. – Отчёт по теме «Полька». – Москва, АО «САПФИР». – 1970. – 43 с.
28. Исследование возможности создания бескорпусных планарных стабилитронов на напряжение стабилизации 3–5 Вольт для использования в гибридных интегральных схемах. – Отчёт по теме «Негр». – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 1972. – 34 с. – № 2358864. – Инв. № 179.
29. Разработка стабилитронов Д814А – Д814Д по планарной технологии / Научно-технический отчёт по теме «Нагрев» № 1350990. – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 1971. – 197 с. – Инв. № 172.
30. Разработка бескорпусных стабилитронов с жёсткими и гибкими выводами с напряжением стабилизации 4,7 – 5,6 В. – Отчёт по теме «Негр-1» № 3359909. – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 1974. – 157 с. – Инв. № 221.
31. Лабунов В.А. Современные методы легирования полупроводников и перспективы их развития / В.А.Лабунов, В.Е. Борисенко // Зарубежная электронная техника. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1977. – №13(159). – 60 с.
32. Parec P.C. The influence of the reactions kinetics of O₂ and source flow rates on the uniformity of boron and arsenic diffusions / P.C. Parec, D.R. Goldstein, T.C. Chan // Solid–State Electron. – 1971. – V. 14. – P.281-288.
33. Fair R.V. High concentration diffusion in silicon from a doped oxide source / R.V. Fair // J. Electrochem. Soc. – 1973. – V.120, № 7. – P.966-971.
34. Ёсиаки С. Метод диффузии примеси в полупроводник. Патент Яп., кл. 99/5 В12, № 4638659. Заявл.8.11.67., опубл. 13.11.71.
35. Борисенко А.И. Тонкие неорганические плёнки в микроэлектронике / А.И. Борисенко [и др.] – Л.: Наука, 1972. – 114 с.

36. Armstrong W.J. A closed tube technique for diffusion impurities in silicon / W.J. Armstrong, M.C. Duffy // *Electrochemical Technol.* – 1966. – V.4, № 9-10. – P.475 - 479.
37. Nakajima J. A new technique for diffusion into silicon / J. Nakajima, S. Okhawa // *Fujitsu Sci. and Techn. J.* – 1972. – V.1.8, № 2. – P.93-113.
38. Sandhu J.S. Arsenic source vapour pressure kinetics and capsule diffusion / J.S. Sandhu, J.L. Reuter // *IBM J. Res. Develop.* 1971. – V. 15, № 6. – P.464- 468.
39. Ghoshtagore R.N. Low concentration diffusion in silicon under sealed tube conditions / R.N. Ghoshtagore // *Solid-State Electron.* – 1972. – V.15. – № 10. – P.1113 -1120.
40. Chiu R.N. A diffusion model for arsenic in silicon / R.N.Chiu, H.N. Ghosh // *IBM J. Res. Develop.* – 1971. – V.15, № 6. – P. 472 - 476.
41. Канро Т. Диффузия As в Si для создания зон с высокой концентрацией / Т. Канро // *Дэнки сикэнсё ихо.* – 1969. – Т.33, № 6. – С.73-76.
42. Крамер В.А. Формирование диффузионных слоёв для кремниевых эпитаксиальных структур со скрытым слоем / В.А. Крамер [и др.] // *Электронная промышленность.* –1980. – № 8-9. – С. 38-43.
39. 43 Gereth R. Solid- solid vacuum diffusion processes in silicon / R. Gereth, A.Kostka // *J. Electrochemical. Soc.* – 1973. – V.120, № 7. – P.966-971.
44. Разработка и внедрение технологии получения эпитаксиальных структур со скрытыми слоями, легированными мышьяком / Научно-технический отчёт по теме «Мидия». – Москва, АО «САПФИР». – 1970. – 231 с. – Инв. № М-57.
45. Патент США, кл. H01L 9/00, № 3602778. Заявл. 24.09.68, опубл. 31.08.71. Приоритет Яп. от 25.09.67. Зенеровский диод и способ его изготовления.
46. Fair R.B. Zener and Avalanche Breacdown in As implanted low voltage silicon p-n-junctions / R.B. Fair, H.W. Wivell // *IEEE Trans. on Electron. Dev.* – 1976. –V.ED – 23. – № 5. – P.512 - 518.
47. Разработка технологии диффузии мышьяка, пригодной для получения низковольтных стабилитронов / Научно-технический отчёт по НИР «Новь-2». – № Г-15140. – АО «НЗПП с ОКБ». –1974. – 63 с. – Инв. № 204.

48. Скорняков С.П. Получение р-п-переходов в сильнолегированном кремнии методом ампульной диффузии мышьяка / С.П. Скорняков // Электронная техника. – Сер.2. – Полупроводниковые приборы. Технология приборов. – 1979. – Вып.4. – С.91-97.
49. Болтакс Б.И. Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. Ленинград: Наука, Ленинградское отделение, 1972. – 384 с.
50. Okhawa S. Arsenic diffusion into silicon from elemental source / S. Okhawa, J. Nakajima, J. Fucukava // Japanese J. Appl. Phys. – 1975. – V.14. – №4. – P.458-465.
51. Raju P.S. Diffusion of arsenic in silicon / P.S. Raju, N.R.K. Rao, E.V.K. Rao // Indian J. Pure Phys. – 1964. – №2. – P.353-355.
52. Патент ГДР, кл. 21 д 11/02, № 91285. Заявл. 06.08.71., опубл. 12.07.72. Кёхлен Л. Способ получения легирующих порошков для проведения диффузии в ампулах.
53. Патент США, кл. НОІ, № 3650686. Заявл. 01.04.69., опубл. 25.04.72. Диффузионный источник и способ его изготовления.
54. Рцхиладзе В.Г. Мышьяк / В.Г. Рцхиладзе.–М.: Metallургия, 1969.–189 с.
55. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Пер. с англ. под ред. Р.А. Суриса /С. Зи. – М.: «Мир», 1984. – Кн.1 – 455 с.
56. Trumbore F.A. Solid solubilities of impurities elements in germanium and silicon / F.A. Trumbore // Bell Syst. Techn. J. – 1966. – V.39, № 1. – P. 205-233.
57. Карякин Н.И. Краткий справочник по физике / Н.И. Карякин, К.Н. Быстров, П.С. Киреев. – М.: Высшая школа, 1962. – 59 с.
58. Batdorf R.L. Diffusion of impurities into evaporating silicon / R.L. Batdorf , F.M. Smits // J. Appl. Phys. –1959. – V.30, № 2. – P.259-264.
59. Honig R.E. Sublimation study of silicon in the mass spectrometer / R.E. Honig // J. Chemical Phys. –1954. – V.22, № 9. – P.1610-1611.
60. Irvin J.C. Resistivity of bulk silicon and diffused layers in silicon / J.C. Irvin // Bell Syst. Techn. J. –1962. – № 41. – P.387-410.

61. Основы технологии кремниевых интегральных схем. Окисление, диффузия, эпитаксия / Пер. с англ. под ред. Р. Бургера и Р.М. Донована. – М.: Мир, 1969. – 451 с.
62. Иванов-Есипович Н.К. Технология микросхем / Н.К. Иванов-Есипович. – М.: Высшая школа, 1972. – 256 с.
63. Kennedy D.P. Concentration dependent Diffusion of arsenic in silicon / D.P. Kennedy, P.C. Murley // Proc. IEEE. - 1971. – Vol. 59. - № 2. – P.335-336.
64. Строителев С.А. Кристаллохимический аспект технологии полупроводников / С.А. Строителев. – Новосибирск: Наука, 1976. – 190 с.
65. Кэнъити Т. Диффузия фосфора в кремний с применением в качестве источника примеси порошка кремния, легированного фосфором / Т. Кэнъити и др. // Национальный технический доклад. – 1971. – Т.17, № 5. – С.584-591.
66. Скорняков С.П. А.В. Глухов, Г.В. Перов, В.М. Масловский, А.З. Рахматов. Способ управления и стабилизации скорости последидиффузионного (диффузия мышьяка) охлаждения низковольтных (~6 В) кремниевых планарных структур прецизионных стабилитронов и устройство для его осуществления // Патент России № 2538027. 2014. Бюл. № 1.
67. Скорняков С.П., Глухов А.В., Перов Г.В., Масловский В.М., Рахматов А.З., Сеница А.В. Конструкция кварцевой ампулы для диффузии легирующих примесей в кремний (диффузии мышьяка) с встроенным приспособлением для управления скоростью последидиффузионного охлаждения кремниевых р-п-структур // Патент России № 2522786. 2014. Бюл. № 20.
68. Некрасов Б.В. Курс общей химии. М.,- Госхимиздат.- 1955, - 971 с.
69. Скорняков С.П. Способ диффузии мышьяка в кремний. – Авт. свидетельство на изобретение № 888763. БИ, 1981, № 45. – С.278.
70. Эдельман Ф.Л., Мельник И.Г., Латута В.З. и др. О природе цветкообразных дефектов в двуокиси кремния на планарных структурах / Ф.Л. Эдельман, И.Г. Мельник, В.З. Латута и др. // Известия АН СССР. Неорганические материалы. – 1972. – Т.8, № 4. – С.719-723.

71. Скорняков С.П. Предотвращение кристаллизации плёнок SiO_2 при длительной диффузии бора в кремнии / С.П. Скорняков, И.Г. Мельник, А.И. Колосницын // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. – 1976. – Вып. 5. – С.63-65.

72. Скорняков С.П. Барьерные свойства остаточного оксида кремния при формировании низковольтных *p-n*-переходов диффузией мышьяка в сильнолегированном кремнии // Электронная техника. – 2021. – Сер.3. Микроэлектроника – Вып. 1(181). – С. 41-43.

73. Скорняков С.П. Четырёхзондовое устройство для измерения сопротивления полупроводников с повышенной точностью /С.П.Скорняков // Электронная техника. – Сер.8. Управление качеством и стандартизация. – 1980. – С.109-123.

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

75. Fair R.B. Effect of complex formation on diffusion of arsenic in silicon / R.B. Fair, G.R. Weber // J. Appl. Phys. – 1973. – V.44, №1. – P.273 - 279.

76. Hu S.M. Interactions in conventional diffusion process in semiconductors / S.M. Hu, S. Schmidt // J. Appl. Phys. – 1968. – V.39, №9. – P.4272 - 4283.

77. Nakajima J. Simplified expression for the distribution of diffused impurity / J. Nakajima, Sh. Ohkawa, J. Fukukava // Jap. J. Appl. Phys. – 1968. – №10. – P.162-163.

78. Fair R.B. Profile estimation of high concentration diffusion arsenic in silicon / R.B. Fair // J. Appl. Phys. – 1972. – V.43, №3. – P.1278 - 1280.

79. Masters B.J. Arsenic isoconcentration diffusion studies in silicon / B.J. Masters J.M.Fairfield // J. Appl. Phys. – 1969. – V.40, №6. – P.3290 - 2394.

80. Ghoshtagore R.N. Low concentration diffusion in silicon under sealed tube conditions / R.N. Ghoshtagore // Solid-State Electron. – 1972. – V.15. – №10. – P.1113 - 1120.

81. 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.

82. Анализ существующих на предприятиях отрасли контактных систем для планарных структур; получение для стабилитронов и диодных матриц омических контактов, обеспечивающих стабильность характеристик во времени при повышенной температуре и надёжность омического контакта к мелкозалегающим *p-n*-переходам / Научно-технический отчёт по теме «Надежда». – № 701566. – АО «НЗПП с ОКБ». – 1974. – 84 с. – Инв. № 206.

83. Скорняков С.П., Кив А.Е., Мельник И.Г., Якименко Г.Ф. Способ получения омического контакта металл – полупроводник / А.с. на изобретение № 470235. 1975. БИ № 17.

84. 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.

85. Физические методы диагностики в микро- и наноэлектронике / под ред. А. Е. Беляева, Р. В. Конаковой. – Харьков: ИСМА. – 2011. – 284 с.

86. Schwenker R.O. Arsenic clustering in silicon / R.O. Schwenker, S. Pane, F. Leveer // J. Appl. Phys. – 1971. – V.42, № 8. – P.3195 - 3220.

87. Richard B. Effect of complex formation on diffusion of arsenic in silicon / B. Richard, R.V. Fair, R. Gerry, G.R. Weber // J. Appl. Phys. – 1973. – Vol. 44, № 1. – P.273 - 276.

88. Вевюрко Н.Г. Влияние низкотемпературных испытаний на свойства диффузионной структуры СВЧ кремниевого транзистора / Н.Г. Вевюрко, Г.И. Юсупова // Электронная техника. – Сер.2. Полупроводниковые приборы. – 1980. – № 1(136). – С.63 – 71.

89. Скорняков С.П. Влияние низкотемпературных отжигов на параметры низковольтных диффузионных *p-n*-переходов // Электронная техника. – 2021. – Сер.3. Микроэлектроника – Вып. 1(181). – С. 37-40.

90. Rose D. Microplasmas in silicon / D. Rose // Phys. Rev. – 1957. – Vol. 105, № 2. – P.413 - 418.Ч.

91. Тагер А.С., Вальд-Перлов В.М. Лавинно-пролётные диоды и их применение в технике СВЧ / М.: «Сов. Радио», 1968. – 480 с.

92. 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.

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

94. Скорняков С.П. Полупроводниковый прибор // Патент РФ № 1031378. 1980. БИ № 34.

95. Diotec Semiconductor, ФРГ. – DATA Sheet BZX84C2V4 ... BZX84C47. <http://www.diotec.com>.

96. Грехов И.В., Серёжкин Ю.Н. Лавинный пробой p - n -перехода в полупроводниках. Л.: Энергия, Ленинградское отделение. – 1980.

97. Miqitaka M. Avalanche of silicon p - n -junctions by the cooperation of Zener effect and impact ionization / M. Miqitaka // Hitachy Review. – 1970. – V.19, № 10. – P. 4350 - 4357.

98. Александров О.В. Деформация решётки в высоколегированных слоях кремния / О.В. Александров, Р.Н. Кютт, Т.Г. Алкснис // ФТТ. – 1980. – Т.22, №10. – С. 2892 - 2896.

99. Мельник В.Г. Некоторые электронные процессы при пробое кремниевых p - n -переходов: дис. ... канд. т.н.: 01.04.10. – Новосибирск, 1969. –169 с.

100. Скорняков С.П. Низковольтные диффузионные p - n -переходы в технике полупроводниковых приборов // Электронная техника. – 2020. – Сер.3. – Вып. 3(179). – С. 41-45.

101. Аладинский В.К. Теоретические и экспериментальные исследования электронных процессов при пробое p - n -переходов и некоторые аспекты их практического применения: дис. ... д. физ.-мат. наук: 01.04.10. – М., 1973. – 304 с.

102. Аладинский В.К. Об ударной ионизации в германии / В.К. Аладинский // Физика и техника полупроводников. – 1967. – №1. – С.957-959.

103. Скорняков С.П. Туннельный пробой *p-n*-переходов с дефектами структуры // Электронная техника. – 2020. – Сер.3. Микроэлектроника – Вып. 3(179). – С. 5-7.

104. Зенеровский диод и способ его изготовления. – Патент США. – кл. НО1L 9/00, – №3602778. – Оpubл. 31.08.71.

105. Способ изготовления полупроводникового прибора. – Патент США. – кл. НО1L 7/144. – № 3649388. – Оpubл. 14.03.72.

106. Thomson Semiconducteurs. DATA BOOK. – Diodes Zener and Diodes de Protection. – 1986. – 237 p.

107. Полупроводниковые приборы: диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы. Справочник. Под общей редакцией Н.Н. Горюнова. – М. Энергоиздат. – 1982. – 743 с.

108. ОКР «Негр-1». – Разработка безкорпусных стабилитронов с жёсткими и гибкими выводами с напряжением стабилизации 4,7 – 5,6 В. – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 1974. – № Г- 1541. – 205 с. – Инв. № 221.

109. ОКР «Норма». – Разработка безкорпусных стабилитронов на напряжение 2,7 – 4,3 В при токе 250 мкА. – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 1977. – № У-41742. – 105 с. – Инв. № 270.

110. ОКР «Вольт-И8». – Разработка и освоение серийного производства на отечественном предприятии семейства стабилитронов с напряжениями стабилизации от 2,4 до 100 В и мощностью до 1 Вт в корпусах для навесного и поверхностного монтажа, в том числе металлокерамических. – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 2020. – № У-94689. – Инв. № 645

111. ОКР «Настурция-1». – Разработка стабилитрона по аналогу 1N4567 в корпусе ДО-35. – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 1984. – № 97297. – 107 с. – Инв. № 360.

112. ОКР «Нагель». – Разработка ряда стабилитронов с напряжением стабилизации 5.1, 5.6, 9.1, 12, 15, 24, 27 В при токе 50 мкА с разбросом $U_{СТ}$ 2% (аналоги 1N4689С, 1N4690С, 1N4696С, 1N4699С, 1N4699С, 1N4702С, 1N4709С,

1N4711C, ф. Motorola). – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 2004. – № У-83459.
– Инв. № 593

113. ОКР «Настурция-2М». – Разработка прецизионного стабилитрона в бескорпусном исполнении с гибкими выводами, напряжением стабилизации $6,3 \text{ В} \pm 1\%$ при токе $0,5 \text{ мА}$ класса $0,01$ и нормированным уровнем низкочастотного шума (аналог – стабилитрон 2С175ЦА)». – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 2006. – 44 с. – Инв. № 604.

114. ОКР «Новшество». – Разработка малогабаритных прецизионных стабилитронов с напряжением стабилизации $6,3 \text{ В}$ при токе $0,5 \text{ мА}$, устойчивых к воздействию ВВФ 6Ус. – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 2008. – № У-88421
– Инв. № 606.

115. Скорняков С.П. Патент РФ № 2162622, 27.01.2001. Низковольтный термокомпенсированный стабилитрон и способ его изготовления // Патент России № 2162622, 2001. Бюл. № 3.

116. ОКР «Настурция-5». – Разработка стабилитронов на напряжение стабилизации $3,3; 3,9; 4,7; 5,1$ и $6,8 \text{ В}$ в корпусе ДО-35. – 55 с. – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 1984. – Инв. № 358.

117. ОКР «Напористость-4». – Разработка стабилитронов на напряжение $5,6 \text{ В}$ для видеоманитофона. – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 1984. – 62 с. – Инв. № 363.

118. ОКР «Настурция-7». – Разработка стабилитрона на напряжение стабилизации $6,2 \text{ В}$ (аналог VZX79C6V2) в корпусе КД-2 (ДО-35). – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 1985. – 50 с. – № У-19178. – Инв. № 398.

119. ОКР «Настурция-9». – Разработка стабилитронов для винчестерского накопителя. – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 1987. – 66 с. – № У-19178. – Инв. № 437.

120. ОКР «Нейтрон-4». – Разработка стабилитронов по аналогу МА4300 в корпусе КД-2. – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 1989. – 46 с. – № У-19178. – Инв. № 492.

121. ОКР «Нейтрон-1». – Разработка конструкции и технологии изготовления изделий КС433А...КС468А в корпусе КД-3А». – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 1989. – 58 с. – № У-19178. – Инв. № 493.

122. ОКР «Ноль». – Разработка и освоение прецизионного термостатированного стабилитрона, устойчивого к воздействию специальных факторов. – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 2019. – № У-93166 – Инв. № 634.

123. ОКР «Незой-2». – Разработка микросхемы прецизионного источника опорных напряжений, устойчивой к воздействию специальных факторов (аналог AD688ARWZ). – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 2020. – № У-93765. – Инв. № 606.

124. ОКР «Сила-И7-РК». – Разработка и освоение серийного производства на отечественном предприятии семейства радиационно-стойких однополярных и двухполярных низковольтных малошумящих прецизионных источников опорного напряжения. – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 2019. – № У-94688. – Инв. № 644.

125. Носов Ю. Р. Научно-производственное предприятие "Сапфир" в общеисторическом контексте // История науки и техники. –2011. – № 8. – С. 12 – 34.

126. Новое поколение ультра стабильных прецизионных стабилитронов / В.К. Аладинский [и др.] // Измерительная техника. – 1996 г. – Вып.11. – С. 44 – 48.

127. Булах А.Е. Метрологическое обеспечение промышленного производства ультра стабильных стабилитронов // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. – 2005. – Вып. 2 (215). – С. 41–57.

128. Zener Theory and Design Considerations. - Handbook ON Semiconductor. – 2017. – Rev.1. – 54 p.

129. НИР “НЕПТУН”. Разработка базовой технологии бескорпусных температурно-компенсированных стабилитронов на фиксированные значения напряжения стабилизации в диапазоне 5,5-11 В. Рег. номер 1350981. – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 1973. – 106 с.

130. 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.

131. Аладинский В.К. Расчет нелинейности температурной зависимости прямого напряжения p-n-перехода / В.К. Аладинский, Д.А. Барышников, В.Г. Соляр // Электронная техника. – 1986. – Серия 2 Полупроводниковые приборы. – Вып. 4 (155). – С. 3– 5. °

132. Роках А.Г. Конспект лекций по курсам «Действие ионизирующих излучений на полупроводниковые материалы и структуры» и «Действие ионизирующих излучений на полупроводниковые приборы» // Саратов: СГУ. – 2018. – 60 с.

133. Скорняков С.П., Глухов А.В., Чищин В.Ф., Антипин Л.Г., Спириденко Н.С. Способ повышения радиационной стойкости термокомпенсированных стабилитронов // Патент России № 2660317. 2018. Бюл. № 19.

134. Анохин А.С., Антипин Л.Г., Кузьмин К.С., Семенчинский С.Г., Скорняков С.П., Юрлов Ф.А. Результаты измерения динамических параметров прецизионных стабилитронов // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. М.: ФГУП «НПЦАП». – 2017. – №2. – С.19 – 22.

135. Анохин А. С. Источник эталонного сигнала для калибровки параметров электронных приборов акселерометров // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. – М.: ФГУП «НПЦАП». – 2008. – №4. – С.54-61.

136. Анохин А. С. Разработка прецизионного датчика тока для калибровки аналогово-дискретного интегратора акселерометра // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. – М.: ФГУП «НПЦАП». – 2015. – №1. – С.41-45.

137. Исюк В.И., Скорняков С.П. Радиационностойкие прецизионные термокомпенсированные стабилитроны – одна из ключевых научно-технических компетенций ОАО «НЗПП с ОКБ» / В.И. Исюк, С.П.Скорняков // 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.

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

139. Кадуков А. "TVS-диоды – полупроводниковые приборы для ограничения опасных перенапряжений в электронных цепях" // Компоненты и Технологии. – 2001. – № 10. – С. 32 - 36.

140. Скорняков С.П. Кремниевые ограничители напряжения – эффективные элементы защиты радиоэлектронных устройств /С.П.Скорняков, А.З.Рахматов // Компоненты и технологии. – 2008, № 3, – С.70 - 74.

141. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям / М.: Радио и связь.- 1988. – 286 с

142. Технический отчёт по ОКР «Напряжение-4», № 3359909. – “Разработка ограничительных диодов на напряжение пробоя 5 – 6 Вольт”. – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 1984. – 157 с. – Инв. № 352.

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

144. Технический отчёт по НИР «Напряжение-7», № 3359909. – “Исследование путей создания ограничительных диодов на напряжение пробоя 5 В”. – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 1985. – 157 с. – Инв. № 397.

145. Технический отчёт по ОКР «Напряжение-10» – “Разработка ограничительных диодов (ограничителей напряжения) на напряжение пробоя 3,9 В”. – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 1987. – 157 с. – № У-20189. – Инв. № 433.

146. Технический отчёт по ОКР «Напряжение-П» – Разработка [на основе эпитаксиальной технологии] ограничителей с напряжением пробоя 8,2; 15; 75 В в пластмассовом корпусе для системы ЭАТС МТ 20/25 (аналоги PFZD8V2, PFZ15A, PFZ75A)». – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». –1984. –58 с. – Инв. № 355.

147. Скорняков С.П. Ограничители напряжения для электронных автоматических телефонных станций / И.М. Алабугин, Л.З. Валяева, А.А. Меркулов, А.З. Рахматов, С.П. Скорняков // Электронная промышленность. – 1991. – Вып.1. – С.105-106.

148. Блихер А. «Физика тиристорov» / А. Блихер. – Л: «Энергоиздат».- 1981. – 262 с.

149. Патент Франции. №2412168, H01L, 25/04, 29/86, ф. Le Silicium Semiconducteur SSC. Diodes Ecreteuses Surtension. Заявл.15.12.87 г., опубли. 13.07.89 г.

150. Лаев С.А. Исследование лавинного пробоя кремниевых *p-n*- и *p-n-p*-структур в широком диапазоне напряжений и токов и разработка мощных ограничителей напряжения и стабилитронов // Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. ВЭИ им. В.И.Ленина. – Москва, 1973, 148 с.

151. Колпаков А. Большие технологии маленьких диодов // Электронные компоненты. – 2004. – № 11. – С.139 – 144.

152. 1500 Watt Unidirectional and Bidirectional Transient Voltage Suppressors M1.5KE6.8A ÷ M1.5KE400CA Series. – Data Sheet Microsemi Corporation. – 2013. – Rev. E. – P.1-7.

153. Случинская И.А. Основы материаловедения и технологии полупроводников / И.А. Случинская. – М.: Мир. – 2002. – 376 с.

154. Панфилов Ю. В. [и др]. Оборудование производства интегральных микросхем и промышленные роботы: Учеб. для техникумов / Ю. В. Панфилов, В. Т. Рябов, Ю. Б. Цветков // М: Радио и связь. – 1988. – 320 с.

155. Аладинский В.К., Брук В.А., Груев Д.А. [и др]. Способ изготовления сплавных *p-n*-переходов. А.с. № 154960 А1 МПК H01L 21/40 1961.08.18 – дата подачи заявки, дата опубликования - 1963.07.20.

156. Патент СССР № 1225423, 25.08.1984. Скорняков С.П. Способ изготовления слоистых полупроводниковых структур // Патент СССР № 1225423. 1984. БИ. № 24.
157. Скорняков С.П. К вопросу о выборе припоя в конструкции мощных ограничителей напряжения / А.С. Андреев, С.П. Скорняков, А.И. Шамыгин // Электронная техника. – Сер.2. – Полупроводниковые приборы. – Вып.1–1986. – С.97-101.
158. Давидов П.Д. Анализ и расчет тепловых режимов полупроводниковых приборов / П.Д.Давидов. – М.: Энергия, 1967. – 144 с.
159. Ефремов И.С. Расчет нестационарного температурного поля силовых тиристоров / И. С. Ефремов [и др.] // Электричество. – 1970. № 10. – С.34– 37.
160. Леви В.С. Алгоритм расчёта температурного поля силовых вентилях и тиристоров / В.С. Леви, В.С. Остренко, В.Д. Оляк // Электричество. – 1969. –№ 10. – С.194-205.
161. 1500 Watt Peak Power Zener Transient Voltage Suppressors, 1.5SMC6.8AT3 ÷ 1.5SMC91AT3 Series. – Data Sheet On Semiconductor. – 2007. – Rev.7. – P.1-8.
162. 1500 Watt Low Voltage Transient Voltage Suppressors 1N5907, 1N5908. – Data Sheet Microsemi Corporation. – 2003. – Rev.A. – P.1-3.
163. Bidirectional Surge Suppressors GHV-2 ÷ GHV-16 Series. - Data Sheet General Semiconductor Industries, Inc. – 2003. – P.1-3.
164. ОКР «Вольт-И9». – Разработка и освоение серийного производства на отечественном предприятии семейства ограничителей напряжения с напряжением пробоя от 3,9 до 440 В и импульсной мощностью от 0,5 до 15 кВт и защитных диодов на рабочее напряжение 18-200 В в корпусах для навесного и поверхностного монтажа, в том числе металлокерамических. – 2019. – Новосибирск, АО «НЗПП с ОКБ». – 435 с. – № У-94690. – Инв. № 646.
165. Гаряинов С.А. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением / С.А. Гаряинов, И.Д. Абезгауз. – М.:«Энергия». –1970. – 320 с.
166. Скорняков С.П. Полупроводниковый прибор // Патент СССР № 1031378, 1980. БИ № 34.

**Приложение А - АКТ внедрения в серийное производство АО «НЗПП с ОКБ»,
г. Новосибирск, результатов диссертации**

УТВЕРЖДАЮ



А К Т

**внедрения в серийное производство АО «НЗПП с ОКБ»
результатов диссертации Скорнякова Станислава Петровича**

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

Диссертация Скорнякова Станислава Петровича посвящена разработке и исследованию физических принципов создания промышленных технологий получения низковольтных (НВ) диффузионных *p-n*-переходов с туннельным и смешанным механизмами пробоя и разработке на их основе низковольтных стабилитронов, термокомпенсированных стабилитронов, прецизионных термокомпенсированных стабилитронов, в т.ч. ультрапрецизионных и аттестуемых, и низковольтных ограничителей напряжения.

В диссертации Скорнякова С.П. представлены авторские результаты решения проблемы получения НВ диффузионных *p-n*-структур, аналогичных по электрическим параметрам сплавным НВ *p-n*-структурам, и разработки на основе таких *p-n*-структур НВ стабилитронов (НВС), низковольтных силовых ППП – ограничителей напряжения (НВ ОН) и НВ термокомпенсированных стабилитронов (НВ ТКС). Полученные лично Скорняковым С.П. и руководимым им коллективом результаты положили начало созданию новой технологии современных НВ полупроводниковых приборов. Значительная часть полупроводниковых приборов АО «НЗПП с ОКБ» производится в настоящее

время по технологии высококонцентрационной диффузии мышьяка в сильнолегированный кремний.

На основе результатов диссертации Скорнякова С.П. разработаны и внедрены в серийное производство:

- ряд серий НВ стабилитронов общего и специального применения в различном корпусном исполнении с напряжениями стабилизации от 2,0 В до 6,2 В;
- прецизионные НВС с низким разбросом напряжения стабилизации 2С151А, 2С235А с $U_{ст} 5,1 В \pm 2\%$, $9,1 В \pm 2\%$ при $I_{ст} = 50$ мкА и с обратным током в наноамперном диапазоне (< 50 нА);
- серия НВ термокомпенсированных стабилитронов общего применения КС405А, КС405Б с $U_{ст} 6,2 В \pm 5 \%$ при токе 0,5 мА;
- серия прецизионных НВ термокомпенсированных стабилитронов специального применения 2С198А÷2С198К с $U_{ст} 6,3 В \pm 1\%$ при токе 0,5 мА класса точности 0,01 %;
- серия ультра-прецизионных, в том числе аттестуемых, термокомпенсированных стабилитронов 2СП101А ÷ 2СП501Д с напряжением стабилизации $6,1 В \pm 1 \%$ при токе 7,5 мА классов точности до 0,0002% (2 ppm);
- серия НВ ограничителей напряжения с напряжениями пробоя 3,9; 6,2; 8,2 (симметричные); 9,1; 15 Вольт;
- НВ стабилитроны (47 типов) в корпусах для поверхностного монтажа (SMD) с напряжениями стабилизации от 2.0 до 6,2 Вольт;
- НВ ограничители напряжения (22 типа) в корпусах для поверхностного монтажа (SMD) с напряжениями пробоя от 3.9 до 15 Вольт;
- прецизионные термокомпенсированные стабилитроны с напряжением стабилизации в диапазоне (6,175 ÷ 6,198) В, т.е. с разбросом $U_{ст} \pm 0,18 \%$, при токе стабилизации 500 мкА применены в качестве базовых элементов конструкции в разработках серии прецизионных интегральных источников опорного напряжения (ИОН), в частности, 1380ЕС014.

В течение 1974 ... 2020 г.г. Скорняков С.П. был главным конструктором / научным руководителем 21 НИР и ОКР по исследованиям, разработкам технологий, конструированию и внедрению в серийное производство НВ стабилитронов, НВ термокомпенсированных стабилитронов и НВ ограничителей напряжения, выполненных на основе разработанной под его руководством и личном участии базовой технологии получения НВ диффузионных *p-n*-структур диффузией As в сильнолегированный кремний, а также участником 3-х ОКР по созданию интегральных источников опорного напряжения (ИОН), в которых использованы разработанные под его руководством НВ прецизионные термокомпенсированные стабилитроны.

Зам. генерального директора
по научной работе, к.т.н.

Главный инженер



А.В. Глухов

М.В. Яковлев

**Приложение Б - АКТ внедрения в серийное производство АО «FOTON»,
г. Ташкент, результатов диссертации**

Утверждаю

**Директор по производству
АО « FOTON », г.Ташкент, РУз.
д.т.н., профессор А.З. Рахматов**



« 17 » 06 2021

А К Т

внедрения в серийное производство АО « FOTON », г.Ташкент, РУз.,
результатов диссертации Скорнякова Станислава Петровича
на соискание учёной степени доктора технических наук
«Низковольтные диффузионные *p-n*-переходы с туннельным и смешанным
механизмами пробоя в технике полупроводниковых приборов»

Настоящий АКТ составлен в том, что в период с 1988 г. по 1990 г. АО «НЗПП с ОКБ» по решению Главного Управления № 4 МЭП СССР нашему предприятию от АО «НЗПП с ОКБ», в связи с загруженностью мощностей АО «НЗПП с ОКБ», передано производство низковольтных ограничителей напряжения КС410АС (ограничитель напряжения с $U_{\text{проб}} 8,2 \text{ В}$), КС511А ($U_{\text{проб}} 15\text{В}$), КС511Б ($U_{\text{проб}} 75\text{В}$), базирующихся на результатах опытно-конструкторских работ ОКР «Напряжение-Т», ОКР «Напряжение-П», главным конструктором которых был Скорняков Станислав Петрович.

Одним из технологических направлений этих разработок была технология получения низковольтных *p-n*-переходов высоко концентрационной безкислородной диффузией мышьяка в сильнолегированный кремний в условиях эвакуированного реактора.

На основании переданной АО «НЗПП с ОКБ» технологической документации базовых технологий изготовления ограничителей напряжения и изложенных в научно-технических отчётах по ОКР «Напряжение-П», ОКР «Напряжение-Т», принципов конструирования внедрены в серийное произ-

водство АО «ФОТОН» 1,5 кВт-ные ограничители напряжения типов КС410АС (симметричный ограничитель с $U_{\text{проб}} 8,2 \text{ В}$, диффузия As в эвакуированном реакторе), КС511А, КС511Б ($U_{\text{проб}} 15 \text{ В}$, 75 В – диффузия бора из плёнообразующих растворов), а также в дальнейшем по переданной нам технологии диффузии As, поставлено производство НВ ограничителей напряжения 1.5ОН7А с $U_{\text{проб}} 6,2 \text{ В}$ и 1.5ОН8А с $U_{\text{проб}} 7,5 \text{ В}$, и по технологии диффузии бора из плёнообразующих растворов – серия ОН с $U_{\text{проб}}$ от 12 до 1000 В с импульсной мощностью от 1,5 кВт до 30 кВт.

Производство ограничителей напряжения, переданных нашему предприятию Новосибирским Заводом Полупроводниковых Приборов с ОКБ, продолжается и в настоящее время. Российская Федерация - один из основных потребителей этой продукции.

Зам. главного инженера, к.ф.м.н.



А.С. Закиров

Начальник ПЭО



Г.А. Келембет

Зам. начальника 2- цеха



И.Р. Исмаилов

Приложение В – Авторские свидетельства и патенты на изобретения СССР и
РФ по теме диссертации



СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО

№

888763

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР,
Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий
выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:
"Способ диффузии мышьяка в кремний"

Автор (авторы): Скорняков Станислав Петрович

Заявитель:

Заявка № 2915591

Приоритет изобретения 25 апреля 1980г.
Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений СССР

7 августа 1981г.
Действие авторского свидетельства распро-
страняется на всю территорию Союза ССР.

Председатель Комитета

Начальник отдела

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2538027

**СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ СКОРОСТИ
ПОСЛЕДИФФУЗИОННОГО (ДИФфуЗИЯ МЫШЬЯКА)
ОХЛАЖДЕНИЯ НИЗКОВОЛЬТНЫХ (~6В) КРЕМНИЕВЫХ
ПЛАНАРНЫХ СТРУКТУР ПРЕЦИЗИОННЫХ
СТАБИЛИТРОНОВ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО
ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ**

Патентообладатель(ли): **ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ
ОБЩЕСТВО "НОВОСИБИРСКИЙ ЗАВОД
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ с ОКБ" (ОАО "НЗПП с
ОКБ") (RU)**

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012121928

Приоритет изобретения 28 мая 2012 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации 14 ноября 2014 г.

Срок действия патента истекает 28 мая 2032 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2522786

**КОНСТРУКЦИЯ КВАРЦЕВОЙ АМПУЛЫ ДЛЯ
ДИФфуЗИИ ЛЕГИРУЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ В КРЕМНИЙ
(ДИФфуЗИИ МЫШЬЯКА) С ВСТРОЕННЫМ
ПРИСПОСОБЛЕНИЕМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ
ПОСЛЕДИФфуЗИОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ
КРЕМНИЕВЫХ Р-П-СТРУКТУР**

Патентообладатель(ли): **ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ
ОБЩЕСТВО "НОВОСИБИРСКИЙ ЗАВОД
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ С ОКБ" (ОАО "НЗПП
С ОКБ") (RU)**

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012121929

Приоритет изобретения **28 мая 2012 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации **21 мая 2014 г.**

Срок действия патента истекает **28 мая 2032 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2674409

Способ изготовления кристаллов силовых полупроводниковых приборов

Патентообладатель: *Акционерное общество "Новосибирский завод
полупроводниковых приборов с ОКБ" (АО "НЗПП с ОКБ")
(RU)*

Авторы: *Скорняков Станислав Петрович (RU), Красный Иван
Борисович (RU), Глухов Александр Викторович (RU), Глушков
Анатолий Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2017137930

Приоритет изобретения 30 октября 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 07 декабря 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 30 октября 2037 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2162622

Российским агентством по патентам и товарным знакам на основании Патентного закона Российской Федерации, введенного в действие 14 октября 1992 года, выдан настоящий патент на изобретение

**НИЗКОВОЛЬТНЫЙ ТЕРМОКОМПЕНСИРОВАННЫЙ
СТАБИЛИТРОН И СПОСОБ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

Патентообладатель(ли):

Скорняков Станислав Петрович

по заявке № 99113388, дата поступления: 25.06.1999

Приоритет от 25.06.1999

Автор(ы) изобретения:

Скорняков Станислав Петрович

Патент действует на всей территории Российской Федерации в течение 20 лет с **25 июня 1999 г.** при условии своевременной уплаты пошлины за поддержание патента в силе

Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации

г. Москва, 27 января 2001 г.

Генеральный директор

А.Д. Корсакин
А.Д. Корсакин



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2660317

**Способ повышения радиационной стойкости
термокомпенсированных стабилитронов**

Патентообладатель: *Акционерное общество "Новосибирский завод
полупроводниковых приборов с ОКБ" (АО "НЗПП с ОКБ")
(RU)*

Авторы: *Скорняков Станислав Петрович (RU), Глухов
Александр Викторович (RU), Чищин Владимир Федорович
(RU), Антипин Леонид Григорьевич (RU), Спириденко
Никита Сергеевич (RU)*

Заявка № 2017131175

Приоритет изобретения 04 сентября 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 05 июля 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 04 сентября 2037 г.

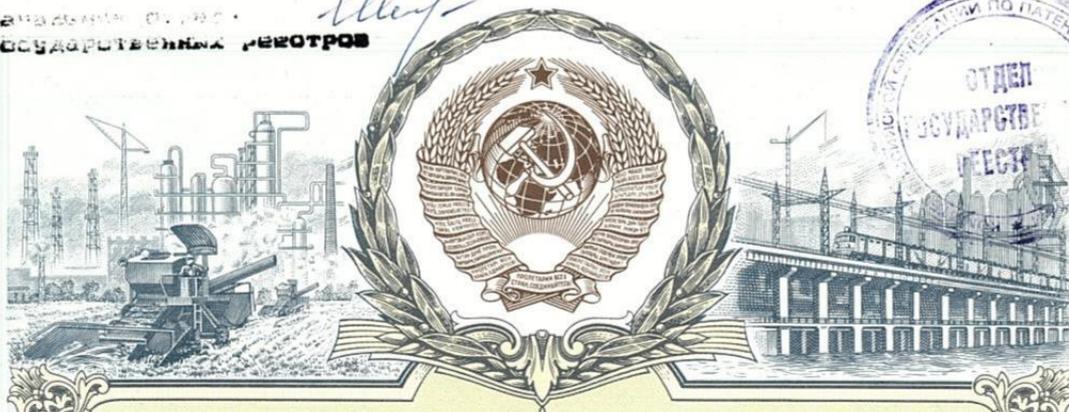


Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕЛ О ВНЕШНЕМ ПРИБИОРАЖЕНО с 27.10.93

Начальник отдела
государственного реестра



СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 1385947

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР,
Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий
выдал настоящее свидетельство на изобретение:

"Низковольтный ограничитель напряжения"

Заявитель: ОРГАНИЗАЦИЯ П/Я А-7124

Автор (авторы): Скорняков Станислав Петрович

Заявка № 3958129 Приоритет изобретения 18 июня 1986г.

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Союза ССР

1 декабря 1987г.

Председатель Комитета

Начальник отдела

[Signature]
[Signature]

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2651624

**СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ
НАПРЯЖЕНИЯ**

Патентообладатель: **АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
"НОВОСИБИРСКИЙ ЗАВОД ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПРИБОРОВ С ОКБ" (АО "НЗПП С ОКБ") (RU)**

Авторы: **Скорняков Станислав Петрович (RU), Глухов
Александр Викторович (RU), Глушков Анатолий Евгеньевич
(RU), Чищин Владимир Фёдорович (RU)**

Заявка № 2016149014

Приоритет изобретения 03 апреля 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 23 апреля 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 03 апреля 2037 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Нелиев

В РОССИЙСКОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ АГЕНТСТВЕ ПО ПРАВАМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБЛЕДИТЕЛЬНОСТИ с 24.10.93

Начальник отдела государственных реестров



СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

№ 1031378

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР, Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий выдал настоящее свидетельство на изобретение:
"Полупроводниковый прибор"

Заявитель: ОРГАНИЗАЦИЯ П/Я А-7124

Автор (авторы): Скорняков Станислав Петрович

Заявка № 3213613 Приоритет изобретения 8 декабря 1980г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Союза ССР

22 марта 1983г.

Председатель Комитета

Начальник отдела



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2641601

Способ пайки силовых полупроводниковых приборов

Патентообладатель: **АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
"НОВОСИБИРСКИЙ ЗАВОД ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПРИБОРОВ С ОКБ" (АО "НЗПП С ОКБ") (RU)**

Авторы: **Колычев Сергей Николаевич (RU), Скорняков
Станислав Петрович (RU), Сеница Анна Вячеславовна (RU),
Чищин Владимир Фёдорович (RU)**

Заявка № 2016106353

Приоритет изобретения 24 февраля 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 18 января 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 24 февраля 2036 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Приложение Г - Зондовое устройство для измерения удельного и поверхностного сопротивлений полупроводников с повышенной точностью

Разработка и исследование низковольтных диффузионных p - n -структур на основе сильнолегированного кремния тесно связаны с контролем удельного сопротивления кремния (ρ_v) и поверхностного сопротивления диффузионных слоёв (ρ_s). Точные измерения сопротивления необходимы в первую очередь при разработке и исследовании новых технологических процессов, каким по-существу является высококонцентрационный процесс диффузии мышьяка в эвакуированном реакторе (кварцевой ампуле), и, в частности, при исследовании распределения диффундирующей примеси в кремний.

Существовавшие промышленные установки измерения ρ_v , ρ_s четырёх зондовым методом характеризовались погрешностями измерения не лучше (7 – 10) %. Единственная образцовая четырёхзондовая установка измерения ρ_v , ρ_s , разработанная ФГУП «Гиредмет», Москва, обеспечивала высокую точность измерений, однако воспользоваться ею в прикладном порядке – такой возможности, естественно, не было.

Погрешность измерений четырёхзондовым методом определяется в основном величинами вариаций расстояний между зондами, определяемых смещением зондов в направляющих каналах зондовой головки и скольжением острий зондов по поверхности тестируемых полупроводниковых пластин.

В зондовом манипуляторе ФГУП «Гиредмет» применены малоистираемые рубиновые направляющие зондов. Собственно, именно они позволяют существенно увеличить точность измерений. Обеспечение высокой точности задания измерительного тока и измерения напряжения при измерении ρ_v , ρ_s четырёхзондовым методом, также определяющей общую погрешность измерений ρ_v , ρ_s , сложности для современных метрологических средств не представляет.

Для точного измерения ρ_v , ρ_s экспериментальных образцов, полученных высококонцентрационной диффузией мышьяка, разработан оригинальный прецизионный четырёхзондовый манипулятор [72, 73]. В отличие от аналогичных промышленных манипуляторов и образцового манипулятора АО «Гиредмет» в

разработанном манипуляторе вариации расстояний между зондами сведены к минимуму. Достигается это тем, что два центральных зонда зондовой головки, на которых измеряется падение напряжения на сопротивлении полупроводника, неподжны друг относительно друга. Соответственно, вдвое меньше вариации расстояний между крайними токовыми зондами и центральными потенциальными зондами. При неизбежной микро разновысотности неподжных потенциальных зондов их контактирование с плоскостью полупроводниковой пластины осуществляется за счёт встроенной в предметный столик перпендикулярно зондам поворотной оси качания, рисунок П.1:

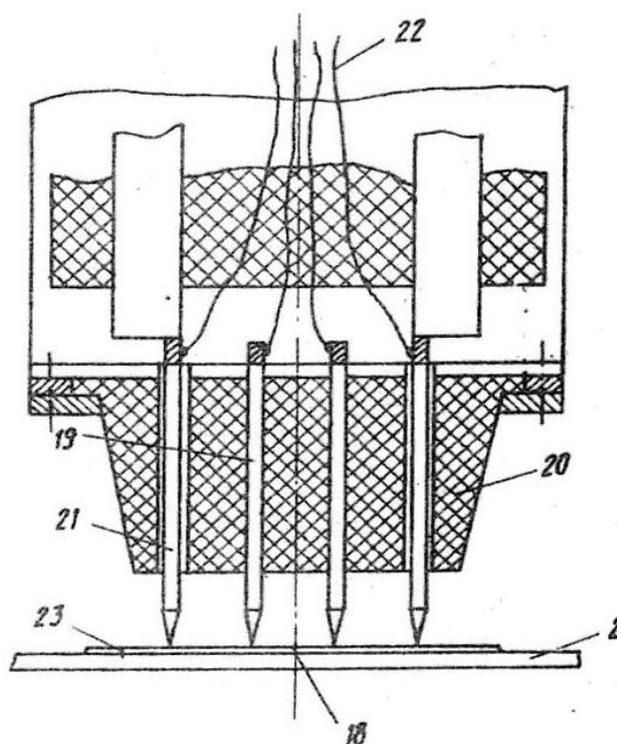


Рисунок П.1 – Четырёхзондовая головка с фиксированными потенциальными зондами и поворотный столик: 19 – фиксированный зонд; 21 – подвижный токовый зонд; 18 – поворотная ось качания; 2 – поворотный предметный столик; 23 – измеряемая пластина кремния; 20 – акриловая пластмасса; 22 – вывод

На рисунке П.2 представлена схема контактирования неподжных зондов 19 с поверхностью образца за счёт поворота оси качания 18:

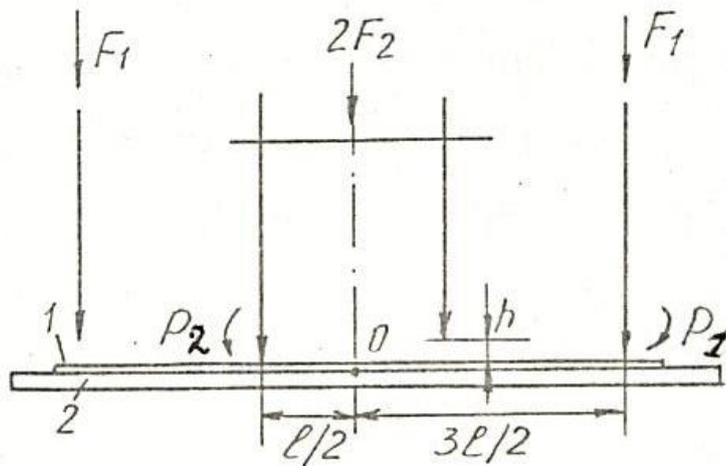


Рисунок П.2 – Схема контактирования неподвижных потенциальных зондов четырёхзондовой головки манипулятора с поверхностью исследуемой кремниевой пластины: 1 – образец; 2 – предметный столик; O – ось качания; F_1 , F_2 – силы, нагружающие подвижные токовые зонды; P_1 , P_2 – моменты сил; h – разность высот неподвижных потенциальных зондов

На рисунке П.3 представлена конструкция четырёхзондового манипулятора с фиксированными потенциальными зондами:

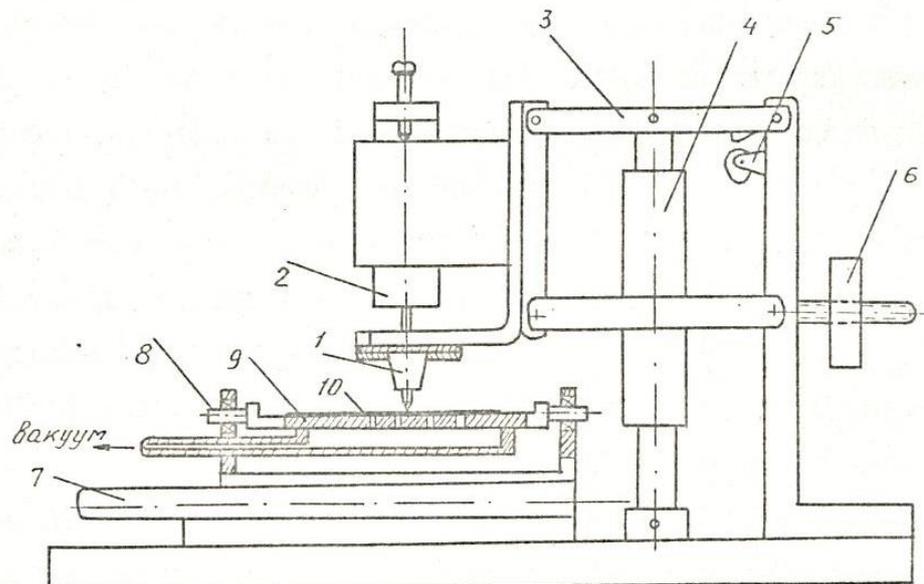


Рисунок П.3 – Схема конструкции четырёхзондового манипулятора с фиксированными потенциальными зондами: 1 – зондовая головка; 2 – грузики на подвижные токовые зонды; 3 – пантограф; 4 – демпфер; 5 – подъёмное устройство; 6 – противовес; 7 – препаратоводитель; 8 – ось качания; 9 – поворотный предметный столик; 10 – образец

Вклад четырёхзондового манипулятора с фиксированными потенциальными зондами в общую погрешность измерений оценивается в 0,5 % при измерении удельного сопротивления и 0,3 % при измерении поверхностного сопротивления.

Сравнительные испытания разработанного четырёхзондового манипулятора с фиксированными потенциальными зондами и манипулятора разработки АО «Гиредмет» проведены на предприятии Х-5476 – Протокол сравнительных испытаний четырёхзондовых головок производства ФГУП «Гиредмет» и ФГУП «ОКБ при НЗПП». Испытания проводились по методике измерения расстояний между отпечатками зондов на омеднённых и покрытых тонким слоем сажи полированных кремниевых пластинах. Установлено, что среднеквадратичные отклонения межзондовых расстояний манипулятора с фиксированными потенциальными зондами в 1,5... 2 раза меньше по сравнению с образцовым манипулятором разработки АО «Гиредмет».

**Приложение Д - Протокол сравнительных испытаний 4-х зондовых головок
производства института АО «ГИРЕДМЕТ» и завода АО «НЗПП с ОКБ»**

"УТВЕРЖДАЮ"

/ ЗАМ. РУКОВОДИТЕЛЯ

ПРЕДПРИЯТИЯ п/я Х-5476

В.А. ФЕДОРОВ В.А.

"27" *1977* 1977 г.

П Р О Т О К О Л

СРАВНИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ 4-х ЗОНДОВЫХ
ГОЛОВОК ПРОИЗВОДСТВА ГИРЕДМЕТ (образца 1972.)
И ОКБ при НЗПП

СВОДНАЯ ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ
СРАВНИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ 4-х ЗОНДОВЫХ ГОЛОВОК

Головка производства ОКБ

Вид кремниевой пластины	Среднеквадратические отклонения межзондовых расстояний, мкм		
	σ_{s1}	σ_{s2}	σ_{s3}
омедненная	1	0,7	0,7
	1,7	2,7	3,3
	2,7	2,0	3,7
	1,7	2,0	1,3
	2,7	2,3	2,3
закопченная	2,7	2,0	1,7
	3,0	2,0	3,3
	2,0	3,3	3,0
	1,7	4,0	4,7
	3,7	4,6	7,0

Головка производства "Гирелмет"

омедненная	4,3	5,3	4,0
	3,7	2,7	3,0
	1,3	2,0	3,3
	2,7	5,0	6,0
	2,3	4,0	3,3
закопченная	3,0	2,3	6,0
	6,7	6,7	7,3
	5,6	4,7	4,3
	4,0	9,0	5,3
	2,7	4,7	5,7

I.1. Работа проведена с целью определения среднеквадратических отклонений межзондовых расстояний для указанных головок с разными конструктивными решениями закрепления зондов: у головки производства Гиредмет все зонды подвижны и расстояния между зондами 1,3 мм. У головки производства ОКБ потенциальные зонды жёстко фиксированы, токовые зонды – подвижны и расстояния между зондами 1 мм.

I.2. Испытания проведены по следующей программе:

- каждой установкой нанесено по 5 серий отпечатков зондов на омеднённой кремниевой пластине и на заковченной кремниевой пластине;
- в серии выполнено по 10 отпечатков;
- обработка результатов измерений выполнена путём определения средних значений межзондовых расстояний и среднеквадратических отклонений для каждой серии;
- результаты математической обработки приведены в таблице.

I.3. В результате сравнительных испытаний выявлено:

- головка производства ОКБ имеет среднеквадратические отклонения межзондовых расстояний в 1,5 – 2 раза меньше по сравнению с головкой производства Гиредмета;
- среднеквадратические отклонения межзондовых расстояний обеих головок при испытаниях на заковченных пластинах выше, чем на омеднённых пластинах.

Начальник лаб. 027

Представитель предпр.

п/я А-1412

Вед. инженер

Шевельков М.А.

Скорняков С.П.