

## ОТЗЫВ

официального оппонента Петросьянца Константина Орестовича  
на диссертацию Скорнякова Станислава Петровича на тему «Низковольтные  
диффузионные *p-n*-переходы с туннельным и смешанным механизмами  
пробоя в технике полупроводниковых приборов»  
по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и  
наноэлектроники, квантовых устройств»  
на соискание ученой степени доктора технических наук

### Актуальность темы:

Диодные стабилитроны являются важнейшим элементом большинства аналоговых и цифровых микросхем широкого применения: стабилизаторов, вторичных источников питания, операционных усилителей, компараторов, генераторов опорного напряжения и др. Особо ответственную роль стабилитроны играют в электронных устройствах, где требуется повышенная точность работы и стабильность параметров. Кроме того, стабилитроны широко применяются в качестве защитных элементов от перенапряжений и импульсных помех.

В этой связи, работа Скорнякова С. П., посвящённая созданию промышленной технологии изготовления ряда низковольтных стабилитронов, в том числе прецизионных термокомпенсированных стабилитронов и ограничителей напряжения, безусловно является актуальной и имеет большое научное и практическое значение для отечественной электронной отрасли.

К основным научным результатам диссертации следует отнести:

1. метод изготовления резких низковольтных *p-n*-структур с большой глубиной залегания (более 3 мкм) с туннельным и смешанным механизмами пробоя, использующий диффузию мышьяка из неограниченного источника в кремниевую *p*-подложку, легированную бором;
2. технологические маршруты изготовления трёх типов стабилитронов: общего применения; термокомпенсированных (обычных и прецизионных); радиационно-стойких термокомпенсированных (прецизионных)

и ультра-прецизионных), а также нового для отечественной электронной промышленности вида п/п диодов: кремниевых ограничителей напряжения с уровнем пробоя менее 7 В;

3. комплекс мер по обеспечению высокой радиационной и температурной стойкости ультра-прецизионных термокомпенсированных стабилитронов, включающий конструктивно-технологические приёмы (легирование золотом, двухкристальная конструкция) и специальное метрологическое обеспечение (на основе 10 В меры напряжения Н4-21 и вторичного эталона Вольта с матрицей элементов Джозефсона).

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций. Научные результаты диссертации получены на основе: во-первых, фундаментальных положений теории физических механизмов туннельного и лавинного пробоя кремниевых р-п переходов; во-вторых, физико-химических основ полупроводниковой технологии и, в-третьих, теории и методов измерений электрофизических и электрических параметров полупроводниковых структур и приборов. На этом основании считаю научные результаты и выводы диссертации обоснованными.

Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций возражений не вызывают. Метод изготовления резких низковольтных р-п переходов в структурах стабилитронов путем диффузии мышьяка предложен впервые в мировой практике. Эффективность разработанных технологий изготовления стабилитронов подтверждается результатами измерений параметров и характеристик изготовленных приборов широкой номенклатуры. Важно, что новизна и приоритет предложенных автором конструктивно-технологических решений защищены 13 авторскими свидетельствами и патентами на изобретения СССР и РФ.

#### Значимость полученных результатов для науки

Предлагаемые в диссертации конструктивные технологические решения являются важным вкладом в решение двух фундаментальных задач полупроводниковой электроники и микроэлектроники: 1) создание сверхстабильных источников напряжения для использования в прецизионной цифровой и аналоговой аппаратуре; 2) создание стабильных низковольтных (1,5 ... 2,5 В) источников питания для современных ИС и БИС со сверхмалым по-

треблением энергии и для БИС и СБИС с глубоко субмикронными и нанометровыми размерами элементов.

#### Значимость полученных результатов для практики

Разработаны промышленные технологии и освоено серийное производство следующих типов низковольтных планарных стабилитронов:

- 1) серия НВ стабилитронов общего и специального применения с  $U_{ст} = 2,0 \dots 6,2$  В;
- 2) прецизионные НВС 2С151А, 2С234А при  $U_{ст} = 5,1$  В;  $9,1$  В ( $\pm 2\%$ ) при  $I_{ст} = 50$  мкА и  $I_{обр} = 50$  нА;
- 3) серия НВТКС общего применения КС405А,Б с  $U_{ст} = 6,2$  В ( $\pm 5\%$ ) при  $I_{ст} = 0,5$  мА;
- 4) серия прецизионных НВТКС специального применения 2С198А – 2С198К с  $U_{ст} = 6,3$  В ( $\pm 1\%$ ) при  $I_{ст} = 0,5$  мА, класса точности  $0,01\%$ ;
- 5) серия ультра-прецизионных НВТКС 2СП101А – 2СП501Д с  $U_{ст} = 6,1$  В ( $\pm 1\%$ ),  $I_{ст} = 7,5$  мА класса точности до  $0,0002\%$ ;
- 6) серия НВОН с  $U_{проб} = 3,9 \dots 15$  В;
- 7) ультра-прецизионные ТКС с  $U_{ст} = 7$  В ( $\pm 0,2\%$ ),  $I_{ст} = 500$  мкА для использования в качестве интегральных источников опорного напряжения.

Практические результаты диссертации следует оценить исключительно высоко.

#### Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.

Разработанные в диссертации типы стабилитронов следует традиционно рекомендовать для использования в электронных устройствах для ответственных применений в гражданской и специальной аппаратуре. Кроме того, очень перспективным сегментом рынка для низковольтных стабилитронов являются источники стабильного питания для микромощных ИС со сверхмалым собственным потреблением, а также БИС и СБИС с глубоко субмикронными и нанометровыми размерами элементов.

Что касается предложенных в диссертации конструктивно-технологических решений и мер по повышению радиационной и температурной стойкости стабилитронов, то их можно рекомендовать для использования в биполярных ИС в каскадах защиты по току, напряжению и темпера-

туре, в источниках опорного напряжения дифференциальных и операционных усилителей, компараторов и др.

### Анализ содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы и приложений.

Во введении сформулирована цель работы и методы её решения. Ориентацию работы на создание технологии низковольтных стабилитронов на основе резких рп-переходов, полученных диффузией мышьяка в сильнолегированную кремниевую подложку, следует признать правильной, отражающей основные тенденции разработок источников стабильного напряжения для современного поколения п/п приборов и микросхем.

В главе 1 рассмотрены физические аспекты работы рп-переходов в режимах туннельного и лавинного пробоя. Отмечены недостатки рп-переходов, полученных методом сплавления алюминия в кремний и намечены пути перехода к резким рп-переходам на основе диффузии мышьяка в кремний, которые составляют предмет исследования диссертации.

Глава 2 посвящена разработке технологии изготовления НВ рп-переходов методом диффузии мышьяка в высоколегированные подложки кремния. Получены профили легирования, зависимости напряжения пробоя, дифференциального сопротивления и др. от параметров тех. процесса. На основе анализа этих зависимостей определены факторы управления электрическими параметрами стабилитронов при их конструировании и производстве.

Глава 3 посвящена разработке промышленной технологии производства НВ стабилитронов общего применения с  $U_{ст} = 2-5,6$  В. Впервые в практику получения п/п приборов с заданными характеристиками в качестве управляющих факторов введены площадь рп-перехода и корректирующий низкотемпературный отжиг ( $T = 500$  °С,  $t = 1-3$  час).

Глава 4 посвящена разработке промышленной технологии производства термокомпенсированных обычных стабилитронов с  $U_{ст} = 6,2$  В ( $\pm 5\%$ ) и прецизионных ( $\pm 1\%$ ) при токе 0,5 мА. Параметры находятся на уровне лучших зарубежных аналогов.

Глава 5 посвящена разработке промышленной технологии производства радиационно-стойких ультра-прецизионных УАП ТКС с  $U_{ст} = 6,1 - 6,2$  В

при  $I_{ст} = 500$  мкА и 7,5 мА, ( $\pm 2\%$ ). Для обеспечения радиационной стойкости использовалось легирование золотом для компенсирующего рп-перехода. Для обеспечения ультра прецизионности создан специальный метрологический комплекс на основе меры напряжения МН4-21.

Глава 6 посвящена разработке промышленной технологии производства НВ ограничителей напряжения: нового для отечественной промышленности класса п/п приборов, необходимого для защиты МЭА с  $E_{пит} = 5$  В от импульсных воздействий. Разработано два типа рп-структур: 1)  $U_{проб} = 6,2$  В;  $x_j = 15$  мкм; 2)  $U_{проб} = 3,9$  В;  $x_j = 8$  мкм с дополнительным верхним  $n^+$ -эпслоем толщиной 15 мкм. Необходимый теплоотвод обеспечивается за счет увеличенной площади рп-перехода и двухсторонних массивных медных дисков, покрытых серебром.

К сожалению, по содержанию диссертации следует высказать ряд замечаний:

- 1) информация о зарубежных технологиях изготовления НВ-стабилитронов, на наш взгляд, недостаточна и не полностью отражает передовой уровень разработок в мире, особенно за последние 10 лет;
- 2) в работе не использованы современные средства приборно-технологического моделирования TCAD;
- 3) на стр. 223 утверждается, что расчётное время включения отечественных ОН составляет  $10^{-12}$  с (пикосекунды), что в  $10^4$  раз меньше, чем у зарубежного ОН фирмы General Semicond. Indust.  $t_{вкл} = 10^{-8}$  с. Откуда в расчётах такая фантастическая разница?
- 4) в разделе ЗАКЛЮЧЕНИЕ на стр. 235 сказано, что все 34 НИОКР (с 1974 по 2020 гг.) «носят пионерский и оригинальный характер». В качестве подтверждения приведены 4 ссылки на источники [160–163], которые не имеют отношения к НИОКР, в которых участвовал автор;
- 5) в тексте диссертации имеет место целый ряд неточностей и «несстыковок», в частности:
  - текст на стр. 150–151 в точности повторяет текст, встречавшийся ранее на стр. 148–149;
  - подпись к рис. 3.4 не соответствует конструкции кристалла с НВ р–п-переходом;
  - и др.

Стиль изложения и качество оформления. Диссертация написана понятным техническим языком. Текст равномерно распределён по главам, снабжён необходимым количеством рисунков и таблиц. Качество оформления удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям.

Оценка публикаций. По теме диссертации опубликовано 40 работ, из них: 14 включено в перечень журналов, рекомендованных ВАК РФ для публикаций результатов диссертаций; 9 работ без соавторов. По теме диссертации получено 13 авторских свидетельств и патентов.

Содержание автореферата отражает содержание диссертации, её основные идеи, выводы и результаты.

#### Заключение.

Оценивая докторскую диссертацию С. П. Скорнякова в целом, несмотря на указанные в отзыве недостатки, следует заключить, что она является законченной научно-исследовательской работой, выполненной лично автором на высоком научном уровне, в которой содержатся новые научно обоснованные технические и технологические решения для одного из наиболее востребованных видов полупроводниковых приборов: стабилитронов общего и специального применения, внедрение которых в промышленное производство вносит значительный вклад в развитие отечественной полупроводниковой электроники и микроэлектроники.

Диссертация удовлетворяет требованиям, установленным «Положением о порядке присуждения учёных степеней», утверждённым постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, а её автор Скорняков Станислав Петрович заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

Отзыв составил Петросянц Константин Орестович, доктор технических наук по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлек-

тронные компоненты, микро и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах» (в настоящее время 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовых устройств»), профессор, профессор-исследователь Департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики им. А. Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»

Официальный оппонент,

доктор технических наук, профессор Департамента электронной инженерии Московского института электроники и математики Национального Исследовательского университета «Высшая школа экономики»

 К. О. Петросянц

Адрес места работы: 123458, Москва, ул. Таллинская, д. 34.

Контактные данные:

тел. +7 (495) 772-95-90\*15208

e-mail: kpetrosyants@hse.ru

Личную подпись проф. Петросянца я

 стоверяю:

СПЕЦИАЛИСТ ПО  
ДЕЛОПРО  
КОРОТКАЯ

Поступил в совет 08.12.2021

Взносомлет 08.12.21.