

ОТЗЫВ

официального оппонента Наумовой Ольги Викторовны
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.

Диссертационная работа С.П. Скорнякова посвящена разработке планарной технологии изготовления низковольтных (НВ) диффузионных кремниевых *p-n*-переходов и на ее основе - разработке промышленной технологии изготовления и внедрения в серийное производство низковольтных стабилизаторов, термокомпенсированных стабилизаторов и ограничителей напряжения.

Актуальность избранной темы определяется:

1) необходимостью разработки:

- низковольтных (с напряжениями стабилизации < 7 В) стабилизаторов и источников опорного напряжения для средств высокоточной измерительной техники и современных радиоэлектронных устройств (РЭУ), в частности, для ракетной и ракетно-космической техники,
- низковольтных ограничителей напряжения для защиты РЭУ от электромагнитных импульсов различной природы,

2) повышением требований к параметрам современных низковольтных источников опорного напряжения (срок эксплуатации, воспроизводимость электрических параметров, их временная стабильность, габариты, и др.), которым на момент написания диссертации не удовлетворяли промышленные отечественные источники опорного напряжения на основе стабилизаторов, изготовленных по сплавной технологии (вплавления алюминия в сильнолегированный кремний *n*-типа проводимости).

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна.

В диссертации, в порядке замещения сплавной технологии, разработана оригинальная технология получения НВ планарных диффузионных *p-n*-структур высококонцентрационной диффузией мышьяка в эвакуированном реакторе из неограниченного источника. На ее основе разработаны и внедрены в серийное

производство (АО «НЗПП Восток», г.Новосибирск, АО «ФОТОН», г.Ташкент) ряд серий НВ стабилитронов, термокомпенсированных стабилитронов и ограничителей напряжения с повышенной стойкостью к спец. воздействиям. Масштаб производства составляет до полумиллиона штук НВ приборов в месяц. Большой объем полученных в диссертации С.П. Скорнякова результатов, обладает достоверностью, явной новизной и практической значимостью. В этой связи можно отметить следующие результаты работы:

1. Установлена эмпирическая зависимость напряжения пробоя *p-n*-переходов с туннельным и смешанным механизмами пробоя от площади *p-n*-перехода.
2. Разработана технология высококонцентрационной диффузии As из неограниченного источника, которая обеспечивает получение НВ *p-n*-структур с напряжением пробоя до 2.0 В (включительно).
3. На основе технологии высококонцентрационной диффузии As в сильно легированный кремний *p*-типа проводимости и эффекте температурной трансформации легирующей примеси в диффузионном слое, разработана оригинальная технология получения НВ термокомпенсированных стабилитронов (НВ ТКС) общего и специального назначения с прецизионными параметрами:

- температурный коэффициент напряжения стабилизации - до 0,0001%/°С ,
- нестабильность напряжения стабилизации - до 0,0002% за 1000 ч,
- напряжение НЧ шума - менее 2 мкВ,
- нелинейность температурной зависимости напряжения стабилизации - менее 100 мкВ при уровне напряжения стабилизации (6,1–6,3) В

4. Разработана промышленная технология низковольтных ограничителей напряжения (ОН). Показано, что по сравнению с зарубежными аналогами, разработанные ОН обладают повышенной стабильностью к электромагнитным воздействиям.

Результаты работы опубликованы в авторитетных изданиях. На разработанную технологию диффузии мышьяка, конструкции и способы изготовления стабилитронов и ограничителей напряжения получены 13 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

Значимость для науки и практики полученных автором результатов.

1. Полученные в диссертации экспериментальные зависимости основных электрических параметров от концентрации легирующей примеси в базе и плотности тока через низковольтный диффузионный *p-n*-переход

- подтверждает основное положение теории туннельного пробоя относительно влияния структурных дефектов на электрические параметры низковольтных *p-n*-переходов,

- являются основой для расчёта конструкций и режимов диффузии примеси для НВ стабилитронов, термокомпенсированных стабилитронов, НВ ограничителей напряжения, как нового в отечественной электронике класса полупроводниковых приборов для защиты от электромагнитного излучения.
2. Впервые в практике конструирования и технологии изготовления НВ полупроводниковых приборов предложены и реализованы способы управления и тонкой корректировки электрических параметров НВ *p-n*-структур, основанные на использовании 1) зависимости напряжения пробоя от площади *p-n*-перехода и 2) низкотемпературных отжигов.
 3. Решена проблема импортозамещения электронной компонентной базы микроэлектроники в сегменте НВ стабилитронов, ТКС и ОН.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации. Кроме организации промышленного серийного производства НВ приборов на основе разработанных диффузионных *p-n*-структур (стабилитронов, ТКС и ОН), результаты и выводы диссертационной работы могут быть использованы в качестве научно-технологического задела для развития представленного в диссертации направления - создания НВ преобразователей напряжения с отрицательным сопротивлением (на основе *p-n*-структур с туннельным пробоем), что относится к перспективной области полупроводникового приборостроения – негатронике.

Содержание диссертации, её завершенность.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 166 наименований, и пяти приложений, в т.ч. двух актов внедрения результатов диссертации в серийное производство АО «НЗПП Восток», г.Новосибирск, и АО «FOTON», г.Ташкент. Общий объем работы составляет 277 страниц, включая 94 рисунка и 21 таблицу. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 35 научных работах, защищены 13-тью авторскими свидетельствами и патентами на изобретения СССР и РФ.

В целом диссертационная работа представляет результаты авторского выполнения исчерпывающего объёма исследований и разработок, включающего постановку задач, разработку промышленных технологий и внедрение в серийное производство разработанных на основе этих технологий нескольких типов низковольтных полупроводниковых приборов.

Содержание автореферата соответствует основным идеям и выводам диссертации.

В качестве замечаний по работе можно отметить следующее.

1. В лит.обзоре (глава 1) автор пишет, что “в кремниевых $p-n$ -переходах с напряжением пробоя меньше, чем $\sim 4E_g/q$ реализуется туннельный механизм пробоя. В $p-n$ -переходах с напряжением пробоя более $\sim 6E_g/q$ пробой обусловлен в основном лавинным умножением носителей заряда” (E_g -ширина запрещенной зоны кремния). Поскольку напряжение/механизм пробоя также зависят от ширины области обеднения $p-n$ -перехода (от концентрации легирующих примесей), не понятно, почему за критерий используется напряжение пробоя $U_{\text{проб}}$, а не напряженность электрического поля в $p-n$ -переходе.

2. В работе установлена эмпирическая зависимость $U_{\text{проб}}$ $p-n$ -перехода с туннельным и смешанным механизмами пробоя от его площади/диаметра “окна” под диффузию в защитном оксиде кремния. Фактически, получена зависимость $U_{\text{проб}}$ от квадрата радиуса $p-n$ -перехода. Из литературы известны зависимости $U_{\text{проб}}$ от радиуса кривизны $p-n$ -переходов при лавинном пробое (например, Т.А. Исмаилов и др. Известия вузов России. Радиоэлектроника. №2, с.23-26, 2017). В работе не обсуждается, в чем особенности/преимущества предложенного автором подхода в сравнении с известным из литературы.

Сделанные замечания не ставят под сомнение основные результаты, выводы и защищаемые положения и не снижают ценности работы, которая, как уже отмечено выше, обладает научной новизной и практической значимостью. Диссертация хорошо написана. Количество ошибок, опечаток и неточностей, которые неизбежны в работе такого объема, минимально.

Заключение.

Диссертационная работа Скорнякова Станислава Петровича на соискание учёной степени доктора технических наук представляет собой цельную, завершённую во всех аспектах научно-исследовательскую работу, содержащую решение актуальной проблемы получения низковольтных планарно-диффузионных $p-n$ -структур с туннельным и смешанным механизмами пробоя, разработке на основе таких структур и внедрении в серийное производство чрезвычайно востребованных полупроводниковых приборов общего и специального применения – низковольтных стабилизаторов, прецизионных термокомпенсированных стабилизаторов и ограничителей напряжения.

Диссертация полностью соответствует всем требованиям к докторским диссертациям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённым постановлением правительства РФ от 24.09.2013 г. № 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”.

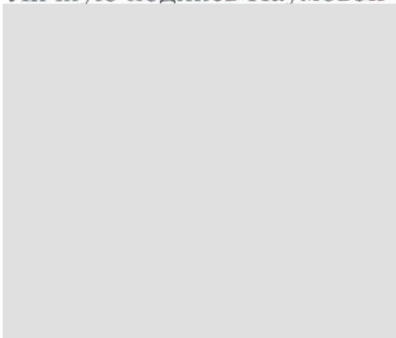
Отзыв составила Наумова Ольга Викторовна, доктор физико-математических наук, заведующая лабораторией технологии кремниевой микроэлектроники, Институт физики полупроводников имени А.В.Ржанова СО РАН, адрес: г. Новосибирск, пр. акад. Лаврентьева 13, ИФП СО РАН, Тел. 8-913-736-17-26, e-mail: naumova@isp.nsc.ru

Официальный оппонент



О.В. Наумова


Личную подпись Наумовой О.В. удостоверяю:



РАН



С.А. Аржанникова

Поступил в свет 07.12.2021 
Одновременно 07.12.21 