

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
СКОРНЯКОВА СТАНИСЛАВА ПЕТРОВИЧА

«Низковольтные диффузионные p-n переходы с туннельным и смешанным механизмом пробоя в технике полупроводниковых приборов»,
представленной к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств».

Разработка низковольтных стабилизаторов (НВС) на напряжения стабилизации менее семи вольт для создания радиоэлектронных устройств с низким уровнем питания и повышенной стабильности и точности является актуальной проблемой. Особенно это относится к разработке низковольтных термокомпенсированных (НВТКС) прецизионных стабилизаторов. Безусловно актуальна и проблема разработки низковольтных (менее 7В) ограничителей напряжения (НВ ОН) для элементов защиты электронных устройств от воздействия электромагнитных импульсов.

Производимые отечественные НВС первого поколения изготавливались по сплавной технологии. В целом эта технология решает проблему получения НВС, но полученные приборы имеют ряд недостатков: низкий уровень временной стабильности и надежности, недостаточный по современным меркам срок службы, массогабаритные показатели.

Соискатель Скорняков С.П. выполнил значительный по объему цикл работ по созданию технологий изготовления низковольтных стабилизаторов, устраняющих недостатки сплавных НВС.

К сожалению оценка актуальности выполненной работы, несколько осложняется тем, что период выполнения диссертационного исследования составляет около 50 лет, и то что было актуально и решено соискателем в семидесятые и восьмидесятые годы становится менее актуальным в наше время.

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы из 166 наименований и 5 приложений. Общий объем диссертации 277 страниц.

В первой обзорной главе описаны хорошо известные вопросы, касающиеся механизмов пробоя p - n переходов. Для описания используется ограниченный объем литературы, изданный в шестидесятые и семидесятые годы. Приводятся формулы без ссылок на то, откуда они взяты, зачастую без расшифровки параметров формул. Соискатель использует, например, понятие ширины запрещенной зоны p - n перехода (стр. 32), что не совсем правильно. Содержание раздела 1.1.2 тривиально. В разделе 1.2 дан обзор технологических проблем получения НВС по диффузионной технологии с использованием литературы 60–70 годов. Дано обоснование выбора легирующей примеси (As) для получения планарно-диффузионных переходов. Обосновано предложение об использовании высококонцентрационной диффузии As в вакуумном реакторе для получения НВС.

Сделанные по главе 1 выводы носят в основном (4 из 7) тривиальный характер, текст главы написан трудным для чтения языком.

Глава 2 посвящена разработке технологии изготовления и исследованию низковольтных p - n структур и является самой объемной в диссертации (72 стр.). В разделе 2.1 «Оценка граничных условий проведения экспериментов» дано обоснование использования кремния марки КДБ с удельным сопротивлением 0,001–0,1 Ом·см для изготовления диффузионных p - n переходов и обоснованно предложена температура проведения процесса диффузии 1150 °С. Почему так назван раздел 2.1 – не понятно. В разделе 2.2 описана структура экспериментальных образцов и описание процессов загрузки пластин в кварцевую ампулу и последующие процессы диффузии. Никакого описания исследований, а раздел 2.2 назван «Исследование процессов высококонцентрационной диффузии мышьяка», в разделе нет. Хотя есть абзац на стр. 62 «...приводим только основные из них и связанные с ними расчеты и

исследования». При этом таких расчетов и основных, и связанных с ними исследований в разделе нет.

Далее в разделе 2.3 и 2.4 хорошо прописаны проблемы и их решения по эффективному источнику диффузии мышьяка и роли дефектов в планарных диффузионных структурах. Выявлены различные дефекты на поверхности структур и дано научное объяснение их природы. В разделе 2.5 исследованы барьерные свойства остаточного окисла диоксида кремния на поверхности *p-n* структур при формировании их диффузией мышьяка. В целом раздел написан хорошо, но утверждение автора, что о свойствах SiO_2 известно не очень много, а его изучение в локальных участках с размерами в десятки микрометров требуют неординарной диагностической техники (стр. 89) вызывает недоумение.

Интересные и очень важные результаты представлены в разделе 2.6: получены профили распределения мышьяка в сильно легированном кремнии нейтронно-активационным анализом; концентрационные профили мышьяка, бора и активных примесей As, В, полученные расчетным путем; результаты моделирования профилей распределения мышьяка в сильнолегированном кремнии. В разделе 2.7 получены экспериментальные результаты по $R_g=f(U_{проб})$, $R_g=f(I_{обр})$, $U_{проб}=f(S)$ для различных ρ_v . Полученные результаты интересны и полезны для проектирования НВС.

Соискатель получил зависимости $U_{проб}=f(S)$ и делает на стр. 117 заключение о том, что данная зависимость в исследуемой области напряжений пробоя «подчиняется закону изменения механизмов пробоя в зависимости от площади *p-n* перехода». Во-первых, хотелось бы заметить, что механизм пробоя определяется шириной ОПЗ *p-n* перехода и от площади зависеть не может. Что касается изменения $U_{проб}=f(S)$, то это может объясняться, в том числе, с позиции локального характера механизма как туннельного, так и лавинного пробоя. Во-вторых, кто открыл этот закон, когда и где об этом можно прочесть?

Введение автором понятие «резкость» $p-n$ перехода противоречит общепринятому понятию плавного и резкого $p-n$ перехода по характеру распределения примеси.

В выводах по главе 2 соискатель использует понятие «площадь $p-n$ перехода» плотности тока через $p-n$ переход. Вывод носит спорный характер. Известно, что при переходе к малым размерам, в том числе и площади, происходит изменение параметров. Возможно, что при уменьшении площади перехода будет возрастать плотность тока, как проявление размерного эффекта.

Глава 3. В начале главы идет повторение информации из введения по актуальности темы. Затем следует заключение об отсутствии информации о технологии НВС за рубежом. Если это так, то возникает вопрос об актуальности работы. Далее излагается обзор существующих конструкций по НВС. Результаты исследований представлены в виде ВАХ двух вариантов структур НВС, экспериментальной зависимостью $U_{проб}=f(S)$.

В разделе 3.1 установлена ранее неизвестная закономерность: при площадях $p-n$ перехода менее $4,5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$, резко возрастает разброс значений $U_{ст}$ и r_g и дано объяснение этому с позиции недоступности реагентов, поступающих к «окну» с малым диаметром в защитном слое SiO_2 .

В разделе 3.2 очень упрощенно описан технологический процесс изготовления НВС по планарно-диффузионной технологии, хотя указывается, что это промышленная технология, основанная на результатах соискателя.

В разделе 3.3 описаны работы по внедрению НВС в промышленное производство в АО «НЗПП с ОКБ» и приведены фотографии изготовленных образцов НВС.

В выводах по главе 3 сказано, что дан анализ литературных данных по технологии и конструированию НВС зарубежными фирмами. На мой взгляд употреблять слово анализ неуместно, так как упомянуто всего 2 патента 1970 и 1972 годов и одна статья 1976, 1 справочник (1982), 1 – иностранный учебник (1969) и монография (1986), т.е. всего 6 источников информации.

В главе 4 вначале описан хорошо известный принцип построения термокомпенсированных НВС (НВ ТКС), приведена также хорошо известная зависимость ТКН от $U_{проб}$. В дальнейшем описана структура НВ ТКС на $U_{ст}=6,2$ В на основе основного $p-n$ перехода с $U_{проб}=5,6$ В включенного в обратном направлении и прямосмещённого компенсирующего $p-n$ перехода, включенного в прямом направлении с падением напряжения $U_{пр.к.}=0,6$ В. Структура НВ ТКС дает $\alpha U_{см}=0,0001\% \cdot ^\circ C^{-1}$. В целом раздел 4.1 главы 4 не содержит конкретных результатов исследований и дает только известную информацию, не имеет научной ценности, а занимает 6 стр. текста. Также выглядит необычно то, что на рисунке 4.1 дается ссылка на работу [106] (иностранный журнал 1986 г.), а на странице 149 соискатель, ссылаясь на этот же рисунок 4.1, дает ссылку на свою работу [122] 2019 года.

Важным результатом диссертационной работы является предлагаемая автором феноменологическая методика расчета НВ ТКС. В диссертации раздел 4.21, посвящённый этой методике занимает 6 стр. и описывает одно из положений, выносимых на защиту. А в тексте автореферата есть два предложения, где упоминается феноменологическая методика (стр. 26). Причем один раз используется слово методика, а другой раз модель.

Прочитав раздел 4.21 по феноменологической методике расчёта, не складывается ясного понимания как этой методикой пользоваться. Написано неконкретно. В главе представлена конструкция кристаллов ТКС марок КС405А, 2С198А÷2С198К и их параметры, в том числе в сравнение с иностранным аналогом 1N4567.

В выводах к главе 4 указано, что разработана промышленная технология изготовления АВ ТКС КС405А, 2С198А÷2С198К по методу высококонцентрационной диффузии мышьяка и их внедрение на предприятии АО «НЗПП с ОКБ», подкреплённая актами внедрения.

Глава 5 посвящена разработке и исследованию радиационно-стойких ультра-прецизионных термокомпенсированных стабилитронов (ПТКС) 2СП101А–2СП501Д. Технологическая основа – высококонцентрационная

диффузия мышьяка. С использованием феноменологической методики произведен прикидочный расчет конструктивных и технологических параметров ультра-прецизионных ТКС. Алгоритм расчета НВ ПТКС 2С198А÷2С198К, принципиально отличается от расчетов НВС КС405А и 2С198А÷2С198К введением дополнительного параметра – нелинейность температурной зависимости напряжения стабилизации $\Delta U_{л.ст.}$. Что это за параметр четких пояснений не дано.

Далее идет описание процедуры расчета с использованием методики. В частности, на основе исходных данных определяются электрические, конструктивные и технологические параметры: $U_{проб.о.}$, $U_{пр.к.}$, $S_{пр.о.}$, $S_{пр.к.}$, T_1 , t_1 , T_2 , t_2 . При проведении расчетов соискатель допустил ошибку: при диаметре компенсирующего *p-n* переходе 300 мкм, определена площадь $7,5 \cdot 10^{-2}$ см². Правильное значение площади при диаметре 300 мкм составляет $7,06 \cdot 10^{-4}$ см². Из приведённого на стр. 168–170 текста не совсем понятен порядок выполнения расчета. Было хорошо, если бы была проведена от начала и до конца процедура расчета всех параметров НВС. Аналогично по расчетам технологических параметров: дан словесный алгоритм и не приведен расчет

В разделе 5.2.1 идет речь о радиационной стойкости ТКС к воздействию внешних факторов. Диссертант утверждает, что НВС с $U_{см} < 7В$ по определению отличаются высокой радиационной стойкостью. В дальнейшем идет обсуждения изменения $U_{пр}$ (прямое падение напряжения) как основного фактора радиационной стойкости. При этом в приведенном выражении для прямого тока через переход (5.3) допущены неточности, хотя формула для расчета рекомбинационного тока хорошо известна, но в том виде, что приведена в диссертации, она трудно узнаваема. На рис. 5.7 приведены прямая ветвь ВАХ до и после радиационного воздействия. Логично предполагать, что эти данные полученные соискателем, но ссылка дана на конспект лекций (автор Роках А.Г.). Таблица 5.3 показывает, что основной параметр ($U_{см}$) изменяется незначительно (мкВ). Подтверждено что основное изменение при радиационном воздействии связано с изменением $U_{пр.к}$ и достигает 70 мВ. Повышение РС осуществлялось

путем легирования кристалла ТКС золотом. Поскольку однокристалльная структура ТКС этого не позволяет сделать, использован двухкристалльный вариант ТКС. В итоге при воздействии γ - и γ - n излучений показана высокая стойкость к воздействию излучений. При использовании двухкристалльного варианта изменение $U_{пр.к}$ составляет менее 3 мВ. Результаты исследования РС УАПС 2СП301А представлены на рис. 5.10 и 5.11: однокристалльные – уход до 70мВ, двухкристалльные – 3мВ.

В выводах по главе 5 отмечается разработка феноменологической методики, экспериментальное определение не линейной зависимости $\Delta U_{л.см}$ от $U_{проб}$ и J_{p-n} , представлены результаты по оценки РС и её повышение за счет легирования золотом компенсирующего перехода. В выводе 6 констатируется разработка промышленной технологии изготовления УПТКС и их внедрение.

Глава 6 посвящена созданию ограничителей напряжения (ОН). Автор отмечает, что эта работа по созданию нового в отечественной электронике класса полупроводниковых приборов – ОН на напряжении менее 7В. В главе предложен механизм отказа ограничителей, базирующийся на явлении генерации тепловых волн из области $p-n$ перехода при прохождении периодических импульсов нагрузки, что приводит к накоплению механических напряжений в кристалле. Это сопровождается нарушением структуры кристаллической решётки кремния и деградации параметров $p-n$ перехода.

Приведены результаты по сравнению отечественных и зарубежных НВ ОН, показывающие, что отечественные приборы 2С414А и 2С408А имеют время включения 10^{-12} с, что на 4 порядка лучше, чем у иностранных аналогов GHV-2 и GHV-8. Изложены основные принципы конструирования и технологии ОН.

Впервые в мировой практике диффузия мышьяка, отличающегося относительно низким коэффициентом диффузии, применена для получения глубоких $p-n$ переходов, лежащих в основе конструкции основных приборов защиты кремниевых ОН. Это объясняется использованием диффузионно-эпитаксиальной конструкции кристалла, где поверх диффузионного слоя наносится дополнительный эпитаксиальный n^+ -слой, легированный фосфором,

толщиной 15 мкм. Дано объяснение механизма наблюдаемого эффекта. Достигнутая глубина залегания p - n перехода 15 мкм обеспечивает требуемый уровень импульсной стойкости до 900 импульсов по сравнению с 300 (при $I = 200$ А).

На страницах 215–216 текста диссертации представлены значения тепловых сопротивлений для элементов тепловой эквивалентной схемы без пояснения каким образом они определены.

Неудачно выглядит первый абзац раздела 6.7: об использовании нелинейной зависимости $U_{проб} = f(S)$ для создания нового вида полупроводниковых приборов с отрицательным дифференциальным сопротивлением (ОДС) и ссылкой на работу [165]. Неудачно, в связи с тем, что эта работа 1970 года и не принадлежит соискателю. Хотя по тексту можно предполагать, что это полученные Скорняковым С.П. данные по зависимости $U_{проб} = f(S)$, которые позволяют именно ему создать новый вид прибора с ОДС.

При разработке преобразователя напряжения получены ВАХ обратной ветви (рис. 6.14), по утверждению соискателя имеющая участок ОДС (стр. 228 конец второго образца). К сожалению наличие ОДС на рис. 6.14 не наблюдается.

Научная новизна

В результате выполнения огромного объёма работы соискателем получены следующие новые научные результаты.

1. Методом высококонцентрационной диффузии мышьяка из неограниченного источника в эвакуированном реакторе изготовлены p - n переходы, на основе которых организовано промышленное производство НВС.

2. На основе низковольтных диффузионных p - n переходов, полученных высококонцентрационной диффузией мышьяка, разработаны и организовано промышленное производство низковольтных ОН.

3. Предложено при разработке НВС, НОН, НТКС использовать кроме традиционных параметров полупроводника и режимов диффузии, дополнительные элементы корректировки $U_{проб}$ – площадь p - n перехода и низкотемпературные отжиги.

4. Разработана феноменологическая методика расчета конструктивно-технологических параметров прецизионных ТКС на напряжение $U_{cm}=6,1\text{В}$ и ток $I_{cm}=7,5\text{ мА}$, использующая в качестве важнейшего параметра – величину нелинейности температурной зависимости напряжения стабилизации $\Delta U_{л.см}$.

Кроме указанных соискателем результатов, имеющих научную новизну и перечисленных выше, отмечаю дополнительные научные результаты, обладающие новизной.

1. Впервые в мировой практике диффузия мышьяка, имеющего низкий коэффициент диффузии, использована для получения глубоких *p-n* переходов, лежащих в основе конструкций силовых приборов защиты ОН.

2. Предложен механизм отказа ОН, связанный с накоплением механических напряжений, создающих структурные несовершенства кристаллической решётки кремния *p-n* переходов, что приводит к деградации его характеристик.

3. Повышение импульсной стойкости ОН достигается за счет использований диффузионно-эпитаксиальной конструкции кристалла, где поверх диффузионного слоя наносится дополнительный эпитаксиальный n^+ - слой, легированный фосфором толщиной 15 мкм.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных соискателем результатов подтверждается тем, что на основе этих результатов разработаны конструкции и технологии НВС и ОН, которые позволили наладить промышленное массовое производство перечисленных выше приборов в АО «НЗПП».

Обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации

Большинство сформулированных научных положений базируется на значительном экспериментальном материале, не противоречат друг другу, и известным научным законам и хорошо согласуются между собой. Так положение о том, что высококонцентрационная диффузия мышьяка позволяет получать *p-n* переходы, пригодные для создания низковольтных стабилитронов,

подтверждается во всех разделах диссертации, касающихся технологических проблем. Это позволило провести разработку и промышленное производство ряда низковольтных стабилитронов, перечисленных в диссертации (стр. 15–16).

Предложенный механизм смешанного пробоя обоснован теоретически и подтверждается экспериментально, что говорит об обоснованности предложенного механизма пробоя.

Установленная закономерность о зависимости параметров НВС от низкотемпературных отжигов даёт возможность обосновано использовать это положение в технологическом процессе и подтверждает обоснованность высказанного положения.

Обнаруженная зависимость $U_{проб}$ от площади $p-n$ перехода позволила высказать положение о том, что варьированием площади (S_{p-n}) можно управлять параметрами стабилитрона, что и было показано в ряде разделов диссертации, что подтверждает обоснованность высказанного положения.

Поскольку в работе достаточно много результатов и выдвинутых положений, то перечислить их невозможно. Поэтому ограничимся приведенными выше и сделаем ещё раз заключение о том, что большинство высказанных соискателем научных положений обоснованно.

К числу необоснованных заключений можно отнести, на мой взгляд, положение о том, что нет прямой зависимости ВАХ НВ $p-n$ переходов и соответствующих им значений r_g для заданных $U_{проб}=const$ от характера распределения легирующей примеси в $p-n$ переходе. Вывод сделан на основании рис. 2.30, который отображает результаты некорректно поставленного эксперимента.

Вызывает сомнение обоснованность вывода о том, что структурные дефекты в объеме сильнолегированного полупроводника не препятствуют равномерному распределению тока по площади $p-n$ перехода (вывод 7 по главе 2).

Разработанная феноменологическая методика расчета носит ограниченный характер и позволяет произвести расчет НВС на $U_{ст} = 6,1$ В и $I_6 = 7,5$ мА (пункт 4 научной новизны, стр. 14).

В большинстве своем выводы и рекомендации сделаны соискателем обоснованы.

Замечания по диссертационному исследованию

Замечания по диссертации можно разделить на 2 группы:

Замечание непринципиального характера. Их много.

1. Диссертация написана очень трудным для чтения языком, содержит предложения объемом до 20 строк (стр. 233). Для того, чтобы понять суть предложения необходимо было правильно расставить знаки препинания, выбросить лишние слова.

2. Соискатель достаточно часто использует неуместные и ненужные слова и обороты речи. Так на стр. 10 (предпоследний абзац) написано «... решение проблемы надо искать в нетрадиционной области поля действий.»; «Традиционный» промышленный кремний (стр. 57); предельно жесткие температуры (стр. 59); «анализ базовой зависимости прямого падения напряжения...» (стр. 149) и т.д.

3. Соискатель, видимо, после того как написал диссертацию, прочитать её ещё раз не соизволил. В результате огромное (более 20) число ссылок на рисунки и формулы не соответствует тексту. Всё это очень раздражает, затрудняет чтение и вызывает удивление по поводу неуважительного отношения к читателю.

4. Оформление значительного количества рисунков не выдерживает критики (рис. 1в; рис. 1.4; 2.1; фото на рис. 2.16; рис. 2.26; рис. 2.23 вместо R_g стоит $R_{ст}$; рис. 2.30; рис. 2.31; рис. 2.36 – точки на графике не соответствуют данным табл. 2.5 и 2.6; рис. 3.6 и другие. На ряде структур обозначены не все элементы).

5. Соискатель использует неправильные названия некоторых параметров: ширина запрещенной зоны p - n перехода; ϵ , ϵ_0 – диэлектрические постоянные, вместо ϵ – диэлектрическая проницаемость, ϵ_0 – электрическая постоянная; n_i – собственная концентрация примеси; U_{Bi} – внутренний барьерный потенциал, вместо контактной разности потенциалов; M_n и M_p – коэффициент умножения – коэффициент лавинного умножения; a_n и a_p – коэффициент ионизации – коэффициент ударной ионизации. В тексте одна и та же величина обозначается по-разному, например, r_g , r_d , r_z , R_g .

6. Соискатель излагает материал нецеленаправленно. Принципы научного познания: постановка задачи, идеи ее решения, методы решения, экспериментальное и теоретическое исследование, обсуждения, выводы, заключение и рекомендации зачастую не реализуются, что затрудняет и прочтение работы, и оценку выполненных исследований и результатов.

7. На рис. 2.33 приведен рисунок примитивного фотошаблона для получения диодов с разными площадями. При этом в тексте на стр. 116 автор говорит об использовании специального комплекта фотошаблонов.

При проведении расчетов (стр. 171) автор допустил ошибку при расчете площади p - n перехода. Задавая диаметр перехода 300 мкм, получена площадь $S_{p-n} \approx 7,5 \cdot 10^{-2}$ см². Используя формулу расчета $S = \pi r^2$, получается значение площади $S_{p-n} = 7,06 \cdot 10^{-4}$ см².

8. Автором при рассмотрении феноменологической модели (стр. 168) введен параметр – нелинейность температурной зависимости напряжения стабилизации $\Delta U_{л.ст.}$. Что это такое и ключевой смысл параметра не комментируется. В диссертации $U_{ст} = f(T)$ не приводится.

9. Раздел 4.3 «Разработка, исследование и производство прецизионных термокомпенсирующих стабилитронов 2С198А÷2С405» изложен на двух страницах, содержащих 1 рис. и 1 табл. выполненную с нарушением требований: название на стр. 163, а таблица на стр. 164. Как можно такие сложные проблемы как разработка и исследование излагать на двух страницах? Раздел не дает ответа ни на одну из поставленных задач.

Мелких замечаний подобного типа в диссертации очень много. Оппонент ограничился указанными выше.

Замечания принципиального характера

1. В тексте диссертации содержится 4 положения, выносимых на защиту, а в автореферате их 3. При этом отсутствует положение о разработке феноменологической методики расчетов. Данная ситуация не позволяет научной общественности ознакомиться с одним из важных результатов диссертационного исследования, поскольку в автореферате методика не прописана, а с содержанием текста диссертации мало кто знакомится.

2. Целью работы была разработка эффективного способа получения НВ диффузионных $p-n$ структур, не уступающих по электрическим параметрам сплавным $p-n$ структурам, но превосходящим по технологичности и надежности. К сожалению, в тексте диссертации нет данных по оценке технологичности и исследований по надежности.

3. Автором экспериментально установлена зависимость $U_{проб}(S_{p-n})$, на основании которой сделан вывод о том, что поведение указанных зависимостей, в исследованной области напряжений пробоя, также подчиняется закону изменения механизмов пробоя в зависимости от площади (стр. 117).

Во-первых, такого закона не существует или, если он есть, то автор не указал кто установил этот закон и где с ним можно ознакомиться. Данное заключение соискателя ошибочно, поскольку механизм пробоя от площади $p-n$ перехода не зависит, а определяется шириной области пространственного заряда $p-n$ перехода.

Во-вторых, установленная автором зависимость $U_{проб}=f(S_{p-n})$ не даёт основание сделать заключение о том, что при изменении площади $p-n$ перехода изменится механизм пробоя. Кроме того, соискатель говорит о том, что зависимость $U_{проб}$ от площади $p-n$ перехода, «другими словами можно сказать – от плотности тока через $p-n$ переход». Подмена параметра площадь $p-n$ перехода на плотность тока через $p-n$ переход может быть ошибочной. Дело в том, что плотность тока может быть функцией площади. Хорошо известно, что при

переходе к малым размерам наблюдается размерный эффект, в том числе и зависимости $j=f(S_{p-n})$, когда с уменьшением S_{p-n} , начинается с 10^{-4} см² и менее наблюдается рост j . По наблюдаемой автором зависимости $U_{проб}=f(S_{p-n})$ можно предполагать, что протекание токов при пробое носит локальный характер.

Далее на стр. 118, второй абзац: «...нелинейные соотношения между напряжения пробоя и площадью $p-n$ перехода с туннельным пробоем можно вывести из фундаментального выражения для плотности туннельного тока (см.1.8).

Выражение 1.8 на стр. 35, куда автор отсылает читателя, имеет вид:

$$E_g(T) = 1,17 - \frac{4,73 \cdot 10^{-4} \cdot T^2}{(T + 636)}$$

Естественно никакого вывода не приводится.

Заключение

Несмотря на наличие значительного количества замечаний, представленная к защите диссертация Скорнякова С.П. на соискание ученой степени доктора технических наук, является завершенной научно-квалификационной работой, вносящий значительный вклад в создании ЭКБ электроники России в виде серий НВС, НВТКС, в том числе прецизионных, радиационнотойких и ОН на напряжения менее 7 В, выпускаемых промышленностью на основе научно-технических разработок Скорнякова С.П. Выполненное исследование имеет огромное практическое значение для науки и практики в целях дальнейших разработок новых востребованных НВС, ОН, преобразователей напряжения и их промышленного производства на базе выполненной Скорняковым С.П. диссертации.

Содержание основных результатов диссертационного исследования опубликованы в рецензируемых научных журналах, защищены патентами и авторскими свидетельствами. Факты внедрения разработок Скорнякова С.П. в производство подтверждены актами внедрения. Автореферат дает

представление о содержании диссертации, основных идеях и выводах диссертационного исследования Скорнякова С.П. Диссертация Скорнякова С.П. актуальна, обладает элементами новизны, полученные результаты достоверны, сделанные выводы и заключение обоснованы. Можно утверждать, что в докторской диссертации Скорнякова С.П. представлены научно-обоснованные, технические и конструкторско-технологические проблемы создания широкого ряда НВС и ОН внедрение которых, в промышленное серийное производство, вносит значительный вклад в развитие страны и отечественной электроники.

Таким образом, на основании вышеизложенного можно утверждать, что диссертация Скорнякова С.П. в полной мере соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, а соискатель Скорняков Станислав Петрович достоин присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.2 – «Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники, квантовые устройства».

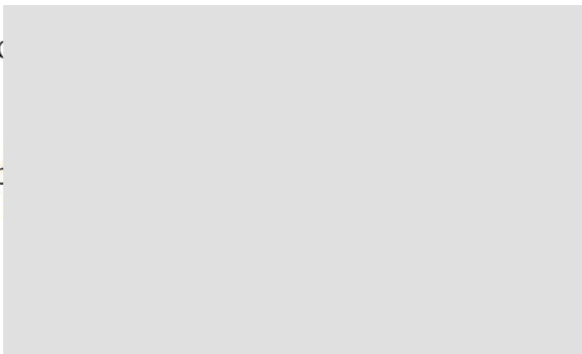
Официальный оппонент

Доктор технических наук (научная специальность 01.04.04 Физическая электроника), профессор, заведующий кафедрой Физической электроники ФГБОУ ВО Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники

 Павел Ефимович Троян

Подпись Троян


Ученый секретарь

 Елена Викторовна Прокопчук

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ФГБОУ ВО ТУСУР

Телефон: +7-3822-41-39-36

Электронная почта: tre@tusur.ru

Поступил в совет 09.12.2021 
Озонакшлен 09.12.2021 