

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента, доктора физико-математических наук Толбанова Олега Петровича, на диссертацию Гусева Антона Игоревича по теме: "Тиристорные коммутаторы с ударно-ионизационным механизмом переключения", представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 – «Электрофизика, электрофизические установки»

### **Актуальность темы диссертационного исследования**

Диссертация Гусева Антона Игоревича посвящена теме создания электронной компонентной базы силовой импульсной техники нового поколения.

Актуальность избранной диссертантом темы не вызывает сомнений. В мире существует огромная проблема разработки высокоэффективных малогабаритных твердотельных элементов силовой импульсной техники субнаносекундного быстродействия.

Развитие силовой импульсной электроники имеет большое практическое значение для различных отраслей. Традиционно, интерес к быстродействующим мощным коммутаторам проявлялся со стороны разработчиков установок для сложных физических экспериментов, ускорителей, а также техники военного назначения для сверхширокополосной радиолокации и средств радиоэлектронной борьбы. За последнее десятилетие формируется устойчивый тренд на разработку и применение источников мощных коротких импульсов для различных сфер гражданского применения: очистка воды, обработка продуктов питания, медицина и т.д. Гражданский рынок подобной продукции может оказаться чрезвычайно большим, но он требует использования компактных (зачастую переносных) и надежных устройств с большим сроком службы. Использование твердотельных коммутаторов является наиболее перспективным подходом при конструировании источников импульсного питания для таких устройств. В этой связи, работа Гусева А.И., где рассматриваются различные аспекты функционирования твердотельных ключей - тиристорных коммутаторов - с целью конструирования мощных источников импульсов с субнаносекундными фронтами, несомненно, является актуальной.

### **Общая характеристика диссертационной работы**

Диссертационная работа имеет следующую структуру: Введение, Четыре главы, Заключение и Список цитируемой литературы. Диссертация изложена на 107 страницах машинописного текста, содержит 35 рисунков, 5 таблиц и 73 библиографические ссылки.

Во **Введении** отмечается и обосновывается актуальность темы диссертации. Эта тема, в самом деле, важна и актуальна и обосновывает возможности использования промышленных тиристоров для работы в режиме формирования волн ударной ионизации. Диссертант приводит во **Введении** хороший краткий

обзор литературы по теме диссертации, вводящий в суть дела и подготавливающий к восприятию дальнейшего изложения результатов исследований самого диссертанта и их места в мировой научной практике. Чётко формулируются цели и задачи исследования, а также их научная и практическая значимость вместе с новыми результатами, полученными в диссертации. Приведено описание структуры работы.

В **Первой главе** достаточно полно представлен обзор литературы по принципам работы электронно-дырочных переходов в режиме формирования волн ударной ионизации. Систематизированы литературные данные исследований различных полупроводниковых структур в режиме формирования волн ударной ионизации. Рассмотрены физические процессы инициирования и распространения ударно-ионизационной волны в структурах различной конфигурации, выполненных как на элементарных полупроводниках, так и на полупроводниках сложного состава. Детально анализируется работа наиболее распространённых ударно-ионизационных коммутаторов. Сделаны выводы, которые предопределили постановку проблемы и описание круга решаемых задач.

Во **Второй главе** представлено описание объектов исследования, схем эксперимента и детально рассмотрены характеристики процесса ударно-ионизационного переключения тиристоров из блокирующего в проводящее состояние без последующего протекания силового тока от внешней схемы. В **2.1** приведена схема экспериментальной установки, дано описание исследуемых тиристоров, средств и методики измерения. В **2.2** рассматриваются экспериментальные закономерности влияния скорости нарастания напряжения на изменение осциллограмм и основных параметров процесса переключения тиристора. В **2.3** приведены результаты исследования влияния как скорости нарастания напряжения на тиристоре, так и температуры структуры на изменение осциллограмм и основных параметров процесса переключения различных тиристоров. В **2.4** представлены выводы по главе 2.

В **Третьей главе** представлены экспериментальные результаты по изучению характеристик тиристоров в режиме ударно-ионизационной волны на стадии протекания тока. В **3.1** приведены результаты исследований переключения тока со скоростью нарастания выше 100 кА/мкс, что важно при создании мощных импульсных генераторов. В **3.2** приведены результаты экспериментальных исследований коммутации тиристором в режиме ударно-ионизационного фронта емкостных накопителей с запасаемой энергией 12 кДж и разрядным током 200 кА. В **3.3** представлены выводы по главе 3.

В **Четвёртой главе** рассматриваются вопросы практического применения тиристорных коммутаторов с ударно ионизационным механизмом переключения. Показаны пути повышения эффективности и ресурса работы мощных импульсных генераторов напряжения на основе тиристорных коммутаторов с ударно ионизационным запуском. В **4.1** приведена схема экспериментальной установки SOS-генератора и методика измерений характеристик. В **4.2** представлена концепция разработки SOS-генератора, где в качестве первичного ключа используется тиристорный коммутатор с ударно-ионизационным механизмом переключения. Изучены процесс коммутации, стадия протекания тока и процесс восстановления. Показана роль первичного контура, в который входит

непосредственно тиристорный коммутатор, первичный накопитель энергии, импульсный трансформатор и измерительная система. В 4.3 приведена схема экспериментальной установки SOS-генератора с 12 кВ первичным тиристорным коммутатором, запускаемым волной ударной ионизации. В 4.4 представлены выводы по главе 4.

**Заключение** содержит перечень основных результатов работы.

### **Оценка научной новизны и достоверности результатов**

Диссертационная работа Гусева Антона Игоревича является целостным, самостоятельным законченным научным исследованием, отличающимся новизной значимых результатов. Следует признать чрезвычайно удачным решение диссертанта на основе большого фактического материала показать возможности и перспективы использования тиристорных коммутаторов в режиме формирования ударно-ионизационной волны с целью конструирования мощных источников импульсов с субнаносекундными фронтами.

В работе представлен значительный объем экспериментальных исследований влияния скорости нарастания напряжений и температуры на время переключения и максимальное коммутируемое напряжение тиристора. Автор не ограничивается только констатацией экспериментальных фактов, но предлагает эмпирические зависимости, и анализирует результаты с использованием современных представлений о неоднородном распространении волн ударной ионизации в кремниевых структурах.

Достижению важных результатов диссертационной работы способствовали правильно выбранный объект исследования, верные методологические подходы, комплексный и системный анализ исследуемой проблемы, корректные, репрезентативные данные исследований фактического и статистического материала, а также использование широкого круга источников и научных работ мирового уровня.

К числу наиболее важных результатов, имеющих научную новизну, можно отнести следующие:

- Результаты исследования влияния температуры и скорости нарастания напряжения на структуре кремниевого тиристора на процесс его переключения.
- Результаты по исследованию влияния скорости нарастания напряжения  $dU/dt$  на стадии запуска тиристора на проводимость тиристора на стадии протекания тока.
- Результаты исследования частотного режима работы тиристорных коммутаторов и времени их восстановления.
- Результаты исследования неоднородности протекания тока по площади структуры при развитии ударно-ионизационных процессов переключения кремниевых высоковольтных тириستоров.

Полученные в работе результаты дополняют современные представления о физических процессах, протекающих в твердотельных коммутаторах с ударно-ионизационным механизмом переключения. Влияние скорости нарастания напряжения на эффективность коммутатора и время его переключения, обнаруженное в эксперименте, будет учитываться при конструировании источников питания силовой импульсной техники.

Достоверность полученных в работе данных и обоснованность научных положений и выводов диссертационной работы обусловлены использованием широкого набора взаимодополняющих экспериментальных методов (осциллографическая регистрация) и современной аппаратуры (осциллографы с полосой пропускания 4-18 ГГц). Для измерения импульсных напряжений использованы широкополосные емкостные делители напряжения, для измерения импульсных токов - низкоиндуктивные шунты и пояса Роговского.

**Практическая значимость.** Практическая ценность работы заключается в том, что приводятся конкретные значения экспериментальных параметров используемых схем и элементная база, что позволяет воспроизвести импульсные генераторы с уникальными характеристиками. Установлено, что тиристорные коммутаторы на основе промышленных низкочастотных тиристоров таблеточной конструкции при их запуске в режиме ударно-ионизационной волны способны переходить в проводящее состояние за время менее 1 нс, коммутировать энергию емкостного накопителя до 12 кДж, при последовательном соединении тиристоров работать при зарядном напряжении до 20 кВ, выдерживать без разрушения протекание тока амплитудой до 200 кА со скоростью нарастания тока более 100 кА/мкс. При величине коммутируемой энергии в десятки джоулей такие коммутаторы имеют время восстановления менее 1 мс и способны работать с частотой следования импульсов до 1 кГц.

Результаты и выводы нашли практическое применение. А именно, применение ударно-ионизационных тиристорных коммутаторов в первичных накопителях энергии мощных SOS-генераторов позволило сократить число ступеней предварительной магнитной компрессии энергии, что значительно повысило эффективность генераторов и существенно снизило их массу и габариты.

**Основные результаты диссертации опубликованы** в 12 работах автора, в числе которых статьи в журналах из перечня рецензируемых российских и зарубежных научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК РФ (ФТП, ПТЭ, Semiconductor Science and Technology, IEEE Transactions on Plasma Science, Review of Scientific Instruments), доложены и обсуждены на российских и международных конференциях и семинарах.

**Содержание автореферата** достаточно полно отражает содержание диссертации. Результаты диссертации прошли апробацию на Всероссийских и международных научных конференциях.

**При оценке диссертационной работы следует сделать следующие замечания:**

1. На стр. 81: Указывается, что испытания тиристоров в режиме ударно-ионизационных волн проводилось на частоте 1 кГц, и после  $10^5$ - $10^6$  импульсов деградации характеристик не наблюдалось. Но при таких заданных условиях длительность наработки составляет менее 2-20 минут. Эти условия не соответствуют ни одному ГОСТу и методики испытаний на стабильность и гарантийную наработку изделий электроники. Поэтому представленные результаты абсолютно не убеждают в отсутствии деградационных процессов в структуре тиристора.

2. В диссертации отсутствуют какие-либо ссылки на патентование либо внедрение результатов выполненной работы, что, по положению ВАК является обязательным условием представлением диссертации на технические науки.

Указанные недостатки и замечания ни в коей мере не снижают научных достоинств диссертации, а скорее носят характер пожеланий на будущее. Полученные в диссертации результаты являются новыми и представляют несомненный научный интерес. Структура и логика изложения материала в диссертационном исследовании выглядят достаточно обоснованными в контексте раскрытия поставленной цели и задач исследования. Цели и задачи исследования, сформулированные автором, были вполне достигнуты. Работа написана логично, доказательно, ясным и строгим научным языком. Стиль и оформление работы не вызывают замечаний. Сильную сторону диссертации составляет разработанный автором комплекс практических исследований и рекомендаций относительно изучаемой проблемы в 4-ой главе диссертационного исследования.

Считаю, что представленная диссертационная работа Гусева Антона Игоревича на тему «Тиристорные коммутаторы с ударно-ионизационным механизмом переключения», безусловно, удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, требованиям положения о порядке присуждения ученых степеней «Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 №842», а сам А.И. Гусев, несомненно, заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки.

**Официальный оппонент:** Заведующий лабораторией функциональной электроники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», доктор физико-математических наук (диссертация защищена по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников), профессор

Толбанов Олег Петрович



634050, г. Томск, пр. Ленина, 36  
тел. +7 3822529852,  
E-mail: [rector@tsu.ru](mailto:rector@tsu.ru)  
<http://www.tsu.ru>

Подпись О.П. Толбанова заверяю:  
Дата



Подпись

УДОСТОВЕРЯЮ  
УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ТГУ

Н. А. САЗОНТОВА