



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИСЭ СО РАН,  
Академик РАН

Н. Ратахин Ратахин Н.А.

«18» января 2019

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу ГУСЕВА Антона Игоревича  
«Тиристорные коммутаторы с ударно-ионизационным механизмом переключения»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

#### Актуальность темы исследования

Основой развития мощной импульсной техники всегда выступал прогресс в исследовании и совершенствовании методов наносекундной коммутации больших импульсных токов. В этом аспекте диссертационная работа Гусева А.И. представляет собой классический пример, поскольку направлена на исследование возможности создания твердотельных сильноточных коммутаторов на основе тириستоров, переключаемых в проводящее состояние волной ударной ионизации. Такой механизм включения позволяет существенным образом увеличить амплитуду коммутируемого тока и скорость его нарастания по сравнению с традиционным механизмом запуска тиристора – импульсом тока через управляющий электрод. Результаты исследования могут найти широкое применение при разработке мощных импульсных генераторов. Актуальность темы выполненной работы сомнений не вызывает.

#### Оценка содержания работы, ее завершенности

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы с общим объемом 108 страниц, содержит 34 рисунка и 5 таблиц. Список цитируемой литературы включает 77 наименований. Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и основные задачи исследований, их научная новизна, представлены положения, выносимые на защиту. **Первая глава** носит обзорный характер, в ней рассмотрены процессы быстрого (субнаносекундного) переключе-

чения различных полупроводниковых структур в проводящее состояние и приборы на их основе. Существенная часть главы посвящена процессам формирования быстрого ударно-ионизационного фронта в кремниевом  $p-n$ -переходе под воздействием быстро нарастающего (1 кВ/нс) импульса перенапряжения. Сформулированы фундаментальные и прикладные задачи диссертационной работы исходя из существующей на сегодняшний день физической модели ударно-ионизационной волны в полупроводниках и технологических требований к мощным твердотельным коммутаторам.

Во **второй главе** приводятся результаты исследования стадии переключения серийных тиристоров большой площади ( $\sim 10 \text{ см}^2$ ) в проводящее состояние за счет распространения ударно-ионизационной волны без последующего протекания разрядного тока от внешней схемы. Показано, что основным фактором, определяющим характеристики процесса переключения, выступает скорость нарастания запускающего напряжения  $dU/dt$ , увеличение которой с 1 до 6 кВ/нс снижает время перехода тиристора в проводящее состояние с  $\sim 500$  до  $\sim 180$  пс. Также показано, что этот же параметр определяет и рабочую температуру, при которой реализуется ударно-ионизационное переключение тиристора в проводящее состояние. При  $dU/dt \leq 1$  кВ/нс волновой эффект переключения тиристора исчезает при температуре  $\sim 100-120$  °С. При  $dU/dt > 4$  кВ/нс запуск волны ударной ионизации реализуется при температуре структуры вплоть до 180 °С. Полученные в этой главе результаты имеют научную новизну, на их основе сформулированы первое и второе защищаемые положения.

**Третья глава** посвящена исследованию тиристорных коммутаторов с ударно-ионизационным механизмом запуска на стадии протекания силового тока. Показано, что коммутаторы из последовательно соединенных тиристоров таблеточной конструкции при их запуске в режиме ударно-ионизационной волны способны работать при напряжении накопителя от 2 до 20 кВ при запасаемой энергии до 12 кДж. При этом реализуется амплитуда разрядного тока вплоть до 200 кА с максимальной скоростью нарастания тока до 130 кА/мкс и эффективности процесса переключения в диапазоне 0.85-0.97. Показана определяющая роль параметра  $dU/dt$  на стадии запуска, увеличение которой ведет к возрастанию проводимости тиристора на стадии протекания тока. Полученный результат объясняется в предположении, что переключаемый ток при ударно-ионизационном механизме запуска тиристора проходит только по части площади структуры. Активная площадь структуры, через которую проходит ток, формируется на стадии запуска, а ее величина возрастает с ростом  $dU/dt$ . По результатам этой главы формулируется третье и частично четвертое защищаемые положения.

В заключительной **четвертой главе** рассматриваются вопросы практического применения тиристорных коммутаторов с ударно-ионизационным механизмом переключения. Приведены результаты по оценке времени восстановления тиристорного ключа и результаты проведенных ресурсных испытаний. Приведены результаты разработки тиристорного коммутатора для его использования в качестве первичного ключа в мощном SOS-генераторе (250 МВт, 300 кВ). Коммутатор имеет рабочее напряжение 12 кВ и коммутирует ток амплитудой 7.5 кА при длительности импульса тока 500 нс, скорости нарастания 54 кА/мкс и частоте следования импульсов до 1 кГц в режиме пачки. Результаты работы, изложенные в этой главе, входят в четвертое защищаемое положение.

Результаты работы опубликованы в 8 статьях в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, а также в 4 докладах, опубликованных в трудах международных конференций и симпозиумов. Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждена практической реализацией научных положений и выводов.

Таким образом, можно заключить, что работа хорошо выстроена логически, грамотно изложена и является завершённой.

#### **Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и теме**

Содержание диссертации полностью отвечает заявленной специальности и теме.

#### **Соответствие автореферата диссертации её содержанию**

Автореферат диссертации в полной мере отражает её содержание.

#### **Личный вклад соискателя в получении результатов исследования**

В докладе и ответах на вопросы автор показал компетентность и высокую квалификацию, не оставив никаких сомнений в авторстве защищаемых положений и выводов.

#### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Развиваемые автором экспериментальные методики, защищаемые научные положения и выводы относительно разработки мощных высоковольтных ключей на основе тиристоров чётко сформулированы и обоснованы в тексте диссертации.

#### **Практическая значимость полученных автором результатов**

Практическая ценность работы также очевидна. Полученные результаты имеют большое прикладное значение, поскольку дают возможность широкому кругу экспериментаторов и разработчиков мощных импульсных устройств использовать серийные си-

ловые тиристоры в качестве силовых наносекундных коммутаторов. В первую очередь это относится к технике генерирования мощных импульсных токов, где коммутатор должен обеспечивать высокие значения амплитуды импульса тока (десятки и сотни килоампер) и скорости его нарастания (десятки и сотни килоампер в микросекунду). Также показано, что применение ударно-ионизационных тиристорных коммутаторов в первичных накопителях энергии мощных SOS-генераторов позволяет сократить число ступеней предварительной магнитной компрессии энергии, что повышает эффективность генераторов и снижает их массу и габариты. Это существенно расширяет область применения импульсной техники при проведении фундаментальных и прикладных исследований, а также ее использования в различных технологических процессах.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты и выводы диссертации Гусева А. И., полученные при исследовании работы тиристоров в режиме ударно-ионизационного переключения, полезны для разработки мощных высоковольтных генераторов, ведущихся в ИСЭ СО РАН, ИЯФ СО РАН, ФИ РАН, ИОФ РАН, а также в ряде институтов Росатома и зарубежных научных центрах.

### **Оценка новизны и научной ценности результатов исследований**

Анализ материала диссертации Гусева А.И. показал, что научная новизна присутствует во всех положениях, вынесенных автором на защиту.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Время восстановления тиристорного ключа после прохождения импульса тока (600 мкс) определено для фиксированных значений параметров разрядного контура (16 Дж, 8 кА, 1.5 мкс). Отсутствие данных о том, каким образом это время зависит от коммутируемой энергии, амплитуды и длительности импульса тока, а также от скорости нарастания напряжения запуска может ограничить область применений тиристоров в таком режиме.
2. Один из принципиальных вопросов по реализации ударно-ионизационного переключения тиристоров на практике заключается в использовании генератора запуска с определенными характеристиками выходного импульса, согласованными с величиной емкости и пробивным напряжением запускаемого тиристора. К сожалению, в работе этот вопрос не проанализирован.
3. Экспериментально полученный ресурс тиристоров с ударно-ионизационным механизмом запуска  $10^6$  импульсов не отражает в полной мере преимущества полупро-

водниковых приборов по сравнению с традиционно применяемыми в мощной импульсной технике газовыми коммутаторами.

**Заключение по диссертации о соответствии её требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней» по п. 9 и 10**

В целом, диссертация Гусева А. И. является научно-квалификационной работой, которая вносит существенный вклад в развитие высоковольтной импульсной техники. Диссертация отвечает требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, утверждённого постановлением правительства Российской Федерации от 24.09.2013г. № 842, а её автор Гусев Антон Игоревич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки.

Диссертационная работа рассмотрена на расширенном научном семинаре Отдела физической электроники ИСЭ СО РАН 16 января 2019 г., протокол № 3. В работе семинара приняло участие: всего 31 сотрудников, из них 6 докторов и 11 кандидатов наук.

Заведующий отделом физической электроники ИСЭ СО РАН,  
доктор физико-математических наук

 В. В. Ростов

Подпись Ростова В.В. заверяю  
Ученый секретарь ИСЭ СО РАН, д.ф.-м.н.

 И. В. Пегель

Ростов Владислав Владимирович,  
доктор физико-математических наук,  
01.04.04 – Физическая электроника  
Федеральное государственное бюджетное учреждение  
науки Институт сильноточной электроники  
Сибирского отделения Российской академии наук  
(ИСЭ СО РАН)

Адрес: 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3  
Тел. (3822) 491-641  
E-mail: [rostov@lfe.hcei.tsc.ru](mailto:rostov@lfe.hcei.tsc.ru)