



«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 ~ 500 до ~ 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