

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д004.024.01 НА БАЗЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук

ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 26.02.2019 г. № 1

О присуждении Гусеву Антону Игоревичу ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Тиристорные коммутаторы с ударно-ионизационным механизмом переключения» по специальности 01.04.13 – «Электрофизика, электрофизические установки» принята к защите 11.12.2018 г. (протокол № 6) диссертационным советом Д004.024.01 на базе федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106, сайт: www.iер.uran.ru, утвержденного приказом Рособнадзора № 1246-дс от 18.07.2008 г.

Соискатель Гусев Антон Игоревич, 1988 года рождения, в 2011 году окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»; обучался в аспирантуре при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте электрофизики Уральского отделения Российской академии наук с 2011 по 2014г.; в настоящее время работает младшим научным сотрудником в лаборатории импульсной техники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории импульсной техники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института электрофизики Уральского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель – доктор технических наук Рукин Сергей Николаевич, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория импульсной техники, заведующий лабораторией.

Официальные оппоненты:

Родин Павел Борисович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, лаборатория мощных полупроводниковых приборов, ведущий научный сотрудник (г. Санкт-Петербург);

Толбанов Олег Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», заведующий лабораторией функциональной электроники (г. Томск);

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (г. Томск), в своем положительном отзыве, подписанном доктором физико-математических наук Ростовым Владиславом Владимировичем, заведующим отделом физической электроники, указала, что диссертация Гусева А.И. является научно-квалификационной работой, которая вносит существенный вклад в развитие высоковольтной импульсной техники. 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. Диссертация отвечает требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ, утвержденного 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.

Соискатель имеет 12 опубликованных работ по теме диссертации, из них опубликованных в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК – 8, в сборниках трудов международных конференций – 4. Наиболее значимые научные работы соискателя по теме диссертации:

1. В работе исследована возможность запуска тиристоров импульсом перенапряжения с коротким фронтом. В экспериментах использовались низкочастотные тиристоры таблеточной конструкции, на которые подавался внешний импульс перенапряжения, нарастающий от 2 до 5–8 кВ за время 0.8–1 нс. При этих условиях время переключения тиристора в проводящее состояние не превышало 200 пс. (Тиристорный коммутатор с субнаносекундным временем переключения / А.И. Гусев, С.К. Любутин, С.Н. Рукин, С.Н. Цыранов // Приборы и техника эксперимента. – 2015. – № 3. – С. 65 – 70);

2. В работе исследован процесс переключения силовых тиристоров из блокирующего в проводящее состояние импульсом перенапряжения с наносекундным фронтом. Найдены эмпирические соотношения, связывающие основные характеристики процесса переключения: напряжение включения, время нарастания импульса до переключения и время перехода в проводящее состояние. (Переключение силовых тиристоров импульсом перенапряжения с наносекундным фронтом / А.И. Гусев, С.К. Любутин, С.Н. Рукин, С.Н. Цыранов // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т. 50, № 3. – С. 398 – 407);

3. В работе показано, что расчетные и экспериментально наблюдаемые времена спада напряжения имеют количественное согласие только в том случае, когда величина активной площади структуры, через которую проходит ток переключения, зависит от скорости нарастания запускающего напряжения dU/dt . Активная площадь увеличивается с возрастанием dU/dt , а также с увеличением удельного сопротивления исходного кремния. При этом активная площадь монотонно приближается к полной площади структуры при $dU/dt > 12$ кВ/нс.

(Исследование процесса спада напряжения при ударно-ионизационном переключении силовых тиристоров / А.И. Гусев, С.К. Любутин, С.Н. Рукин, С.Н. Цыранов // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т.51, № 5. – С. 680 – 688);

4. В работе показано, что максимальная амплитуда тока, которую коммутатор выдерживает без выхода из строя, увеличивается с ростом величины dU/dt на стадии запуска. Обсуждается возможный механизм влияния величины dU/dt на ток пробоя тиристоров. (Коммутация больших импульсных токов тиристорами при их запуске в режиме ударно-ионизационной волны / А.И. Гусев, С.К. Любутин, С.Н. Рукин, Б.Г. Словиковский, С.Н. Цыранов // Приборы и техника эксперимента. – 2017. – № 4. – С. 95 – 101).

5. В работе исследовано совместное влияние температуры тиристорной структуры и скорости нарастания напряжения dU/dt на процесс переключения тиристоров с запуском в режиме ударно-ионизационного фронта. В экспериментах температура варьировалась в диапазоне от 25 до 180 градусов Цельсия, а скорость нарастания напряжения – от 0,5 до 10 кВ/нс. Показано, что основным фактором, влияющим на параметры процесса переключения тиристора, выступает величина dU/dt . При $dU/dt > 4$ кВ/нс возбуждение в структуре ударно-ионизационного фронта возможно при температуре структуры до 180 градусов Цельсия. (Semiconductor opening switch generator with a primary thyristor switch triggered in impact-ionization wave mode / A.I. Gusev, S.K. Lyubutin, A.V. Ponomarev, S.N. Rukin, B.G. Slovikovsky // Review of Scientific Instruments. – 2018. – Vol. 89. – P. 114702).

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

– от ведущей организации; имеются следующие замечания:

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 тиристорov в таком режиме.

2. Один из принципиальных вопросов по реализации ударно-ионизационного переключения тиристорov 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 тиристорov с ударно-ионизационным механизмом запуска 10^6 импульсов не отражает в полной мере преимущества полупроводниковых приборов по сравнению с традиционно применяемыми в мощной импульсной технике газовыми коммутаторами.

– В отзыве на диссертацию официального оппонента д.ф.-м.н. П.Б. Родина имеются следующие замечания:

1. В третьей главе (стр.53-54) автор оценивает среднюю скорость распространения ударно-ионизационного фронта в тиристорной структуре, отождествляя время переключения прибора и время пробега фронта через толщину структуры. В то же время из литературы известно, что при неоднородном переключении диода в режиме задержанного лавинного пробоя – а именно случай неоднородного переключения рассматривается в диссертации для тиристора – такая простая связь между этими двумя временами отсутствует, поскольку падение напряжения на приборе начинает снижаться уже после того, как пробег ударно-ионизационного фронта сформировал замыкающий электроды плазменный канал.

2. Известно, что в тиристоре имеет место распространение включенного состояния, в силу чего часть площади прибора, участвующая в переносе силового тока, вообще говоря, существенно превосходит площадь начального включения. Однако при анализе зависимости площади начального включения тиристора от скорости роста приложенного напряжения, выполненном в третьей главе диссертации, этот эффект не учитывается.

3. В первой главе (стр.19) утверждается, что «время ионизации атомов кремния составляет менее 10^{-11} с». Неясно, какой напряженности электрического поля отвечает приведенная величина времени ионизации.

4. Наименьшие значения экспериментально измеренного времени переключения тиристора, приведенные на рис.2.7, близки к 200 пс (такие же времена отвечают части кривых на рис.2.10). Неясно, как эта экспериментальная величина согласуется с приведенным в диссертации собственным временем нарастания измерительного тракта в 170 пс и полосой пропускания применяемого осциллографа 4 ГГц.

5. На стр. 41 диссертации имеются технические огрехи типографского набора, делающие нечитаемыми математические выражения для времени переключения тиристора. Неясно также, как содержащееся в этом же параграфе утверждение о том, что "процесс спада обусловлен распространением ... ударно-ионизационных волн" может быть поддержано ссылкой на работу [57], в которой, напротив, показано, что при неоднородном переключении время переключения определяется временем разрядки пассивных областей структуры через сформированный пробегом ударно-ионизационной волны плазменный канал.

– В отзыве на диссертацию официального оппонента д.ф.-м.н. О.П. Толбанова имеются следующие замечания:

1. На стр. 81: Указывается, что испытания тиристорov 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.

– В отзыве на автореферат от заведующего лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, доктора физико-математических наук Закревского Д.Э. имеются следующее замечание:

1. Отсутствует стандартизация рисунков: часть подписей на осях графика сделана текстом на русском, часть символами.

2. Отсутствует строгое определение потерь в данных тиристорах. К примеру, на стр. 15 потери на одном тиристоре достигают 10 МВт (рис.5), тогда на 9 тиристорах по приведенной методике они достигнут 90 МВт. В то же время пиковая мощность на нагрузке 344 МВт. Другими словами, общие потери составят 26% от мощности, вложенной в нагрузку, или, если считать, что других источников потерь нет, то 20% от коммутируемой мощности, что согласуется с рис.5. Поэтому не понятно, как получается «...эффективность переключения в исследованных режимах работы 0,85». В то же время на следующей странице говорится о том, что выделение энергии на тиристоре 212 Дж при запасенной энергии 10 кДж.

3. На стр. 17 говорится: «На рис. 7 изображена зависимость проводимости тиристора от скорости нарастания напряжения dU/dt в разные моменты времени», но на рис.7 приведена зависимость только в один момент времени.

4. Не очень понятно, как зависят потери от свойств цепи, в частности от скорости нарастания тока в ней. В частности, рис.5 и рис.9 демонстрируют различное остаточное напряжение на тиристорах. Связано ли это с более низким током (7.5 кА против 45 кА) или со скоростью его нарастания (54 против 130 кА/мкс).

– В отзыве на автореферат от главного научного сотрудника акционерного общества «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», Госкорпорации «Росатом», доктора технических наук Фридмана Б.Э. имеются следующие замечания:

1. В автореферате отсутствует информация об источниках импульсов перенапряжения с коротким фронтом («компактных твердотельных генераторов», стр. 9), примененных для включения тиристорov. В тоже время известно, что создание устройств для запуска двухэлектродных газоразрядных или полупроводниковых приборов это сложная техническая проблема, ограничивающая применение двухэлектродных коммутаторов в импульсных устройствах.

2. Такой же вопрос возникает при чтении изложения четвертой главы, где доказываются преимущества применения разработанного коммутатора в SOS генераторе, позволившего уменьшить количество ступеней магнитной компрессии в цепи накачки SOS ключа. При этом не понятно, что проще и доступней – генератор импульса запуска тиристорov или ступени магнитной компрессии.

3. Осциллограммы на рис. 5 показывают, что в начальный момент времени включения тиристора падение напряжения на нем достаточно высокое (порядка 500 В), что автор работы объясняет тем, что ток «проходит не по всей площади структуры, а только по её части». В диссертационной работе отсутствует сравнение величин начального падения напряжения (или начальной проводимости) с другими типами полупроводниковых коммутаторов, используемыми в подобных режимах.

4. В работе отсутствует информация о необходимости, критериях и методах отбора тиристорov при их применении в исследованных режимах.

– В отзыве от заведующего научно-производственной лабораторией "Импульсно-пучковых, электроразрядных и плазменных технологий" Инженерной школы новых производственных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего

образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», доктора технических наук, профессора Ремнева Г.Е. имеются следующие замечания:

1. В научные положения на защиту (п.3) вносится не утверждение, а предположение о том, что «переключаемый ток при ударно-ионизационном механизме запуска тиристора проходит только по части площади структуры», как возможное объяснение полученных результатов.

2. Приводимые в научной новизне отличительные признаки («Кремниевые тиристоры таблеточной конструкции с диаметром полупроводникового элемента...») описывают большее количество приборов, чем испытано в работе, распространяя и на них результаты работы. Возможно, необходимы дополнительные исключаящие признаки (например, класс прибора по напряжению и др), для которых верны полученные результаты.

3. Допущены неточности высказываний, упрощения, затрудняющие однозначное понимание материалов работы: «при ... низком электрическом поле...»; «при токах ниже пробивного значения»; «эффективность переключения» (в значении эффективности передачи энергии при коммутации); шкала проводимости рисунка 7 содержит область отрицательных значений.

– В отзыве на автореферат от старшего научного сотрудника лаборатории функциональной электроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», к.ф.-м.н., И.А. Прудаева замечаний нет.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их достижениями в данной отрасли науки, наличием публикаций в соответствующей сфере исследования и способностью определить научную и практическую ценность диссертации. У официального оппонента, доктора физико-математических наук Родина П.Б. основные работы посвящены исследованию полупроводниковых коммутаторов нано- и субнаносекундного диапазона. У

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора, Толбанова О.П. основные работы посвящены исследованию полупроводниковых детекторов рентгеновского излучения, а также быстрых коммутирующих приборов на основе GaAs. Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (г. Томск) является ведущим институтом в России в области мощной импульсной техники и сильноточных наносекундных коммутаторов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

– Показана возможность переключения кремниевых тиристоров с диаметром структуры 32, 40 и 56 мм за счет возбуждения в них ударно-ионизационной волны. Время перехода тиристора в проводящее состояние при таком механизме переключения лежит в диапазоне от 200 до 400 пс.

– Исследовано влияние скорости нарастания напряжения dU/dt в диапазоне 0,5-6,0 кВ/нс на параметры коммутации тиристоров с диаметрами структур 32 и 40 мм в режиме ударно-ионизационной волны без последующего протекания разрядного тока.

– Исследовано совместное влияние температуры тиристора в диапазоне 25-180 °С и скорости нарастания запускающего напряжения dU/dt в диапазоне от 0,6 до 10 кВ/нс на процесс переключения тиристора с диаметром структуры 32 мм. Установлено, что определяющим фактором возбуждения ударно-ионизационного фронта в тиристоре является скорость нарастания напряжения на структуре. Показана возможность переключения тиристора в режиме ударно-ионизационного фронта при температуре до 180 °С при условии, что скорость нарастания напряжения превышает 4 кВ/нс.

– Исследовано влияние скорости нарастания запускающего напряжения dU/dt в диапазоне от 0,6 до 5,0 кВ/нс на характеристики 2-кВ коммутатора на основе тиристора Т143-400-24 с диаметром полупроводникового элемента 40 мм.

Показано, что с ростом dU/dt увеличивается проводимость тиристора, что снижает потери энергии в тиристоре на стадии протекания тока. В частности, начальная проводимость тиристора после его перехода в проводящее состояние увеличивается в ~ 20 раз при увеличении dU/dt с 0,9 до 5 кВ/нс.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– Получены эмпирические зависимости, описывающие взаимосвязь времени нарастания напряжения на тиристоре, максимальной амплитуды напряжения на тиристоре и времени его перехода в проводящее состояние со скоростью нарастания запускаящего напряжения dU/dt .

– В экспериментах с тиристорами диаметром 56 мм показано, что максимальная амплитуда тока, которую коммутатор выдерживает без выхода из строя, увеличивается с ростом величины dU/dt на стадии запуска. Зависимость дана 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 .

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

– Проведены испытания коммутаторов на основе кремниевых серийных тиристоров таблеточной конструкции. Первый коммутатор состоит из 9 последовательно соединённых тиристоров Т343-500-20 с диаметром кремниевой структуры 40 мм и обеспечивает блокируемое напряжение 20 кВ, амплитуду тока 45 кА и скорость нарастания тока 134 кА/мкс. Длительность импульса тока на полувысоте составляет ~ 1 мкс, энергия емкостного накопителя – 400 Дж. Второй коммутатор состоит из двух последовательно соединенных тиристоров Т253-800-24 с диаметром кремниевой структуры 56 мм и обеспечивает блокируемое напряжение 5 кВ, амплитуду тока 200 кА и скорость нарастания тока 58 кА/мкс. Длительность импульса тока на полувысоте составляет 25 мкс, энергия

емкостного накопителя – 12,5 кДж. Эффективность коммутаторов лежит в диапазоне 0,85-0,97 в зависимости от длительности коммутируемого импульса тока. В ходе экспериментов было произведено около 10^2 - 10^3 включений тиристорных коммутаторов, при этом изменений их параметров не наблюдалось.

– На основе тиристоров Т343-500-24 разработан тиристорный коммутатор с рабочим напряжением 12 кВ (шесть тиристоров, соединенных последовательно) для использования в качестве первичного ключа в SOS-генераторе, схема которого содержит только один силовой магнитный элемент – импульсный трансформатор. После включения коммутатора в схеме начинается процесс прямой накачки SOS без использования элементов предварительной компрессии энергии. Тиристорный коммутатор в генераторе работает при напряжении 12 кВ и обеспечивает протекание тока амплитудой до 7,5 кА длительностью ~500 нс и скоростью нарастания ~54 кА/мкс. SOS-генератор имеет выходное напряжение до 300 кВ и пиковую мощность до 250 МВт при длительности импульса ~50 нс и энергии выходного импульса ~10 Дж. В режиме пачки импульсов продемонстрирована работа генератора с частотой следования импульсов 1 кГц. Эффективность разработанного SOS-генератора составляет 0,65 и может быть увеличена до 0,7.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

В работе использованы современные методики, программное обеспечение и аппаратура для измерения параметров быстропротекающих процессов. Система осциллографической регистрации включает широкополосные емкостные делители напряжения для измерения импульсных напряжений, низкоиндуктивные шунты и пояса Роговского для измерения импульсных токов, высокочастотные кабели, широкополосные высоковольтные аттенюаторы и цифровые осциллографы реального времени. Полученные результаты не противоречат физическим принципам и согласуются с литературными данными.

Личный вклад соискателя заключается в:

участии в постановке задач исследования, проведении экспериментов, обработке и интерпретации полученных результатов, подготовке материалов к публикациям и выступлению на конференциях.

Диссертационная работа Гусева А.И. содержит новые научные результаты исследований переключения кремниевых тиристорov в режиме ударно-ионизационного фронта и новую конструкционную разработку мощных импульсных коммутаторов на их основе, что имеет несомненное значение, как для электрофизики, так и для создания прикладных электрофизических установок. Диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

На заседании 26.02.2019 г. диссертационный совет Д004.024.01 принял решение присудить Гусеву Антону Игоревичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 21 человек, из них 7 докторов наук по специальности защищаемой диссертации, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета проголосовали: за 19, против 0, недействительных бюллетеней 2.

Председатель

диссертационного совета

Шпак Валерий Григорьевич

Ученый секретарь

диссертационного совета

Медведев Михаил Владимирович

Дата оформления Заключения

26.02.2019 г.