

**Отзыв официального оппонента 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»

В последние десятилетия полупроводниковые приборы, обеспечивающие большую долговечность, стабильность выходных характеристик и частоту следования импульсов, все более масштабно применяются в мощной высоковольтной импульсной технике, неуклонно замещая традиционные для этой области быстродействующие коммутирующие устройства. Среди импульсных полупроводниковых приборов особое место занимают высоковольтные обострители импульсов, основанные на явлении задержанного ударно-ионизационного переключения высоковольтного перехода и имеющие уникальное – порядка 100 пс – время переключения.

Диссертационная работа А.И. Гусева посвящена исследованию явления задержанного ударно-ионизационного переключения в тиристорных структурах и созданию высоковольтных тиристорных коммутаторов большой мощности, основанных на этом принципе переключения. В диссертации показано, что явление задержанного ударно-ионизационного переключения может быть успешно реализовано в серийно выпускаемых отечественной промышленностью «коммерческих» кремниевых тиристорах. Проведены важные и интересные фундаментальные исследования процессов переключения тиристора в этой сверхбыстрой моде. Предложены и реализованы схемотехнические решения для ударно-ионизационных тиристорных коммутаторов. Проведены исследования созданных коммутаторов. Определены возможности применения тиристорных коммутаторов с ударно-ионизационным механизмом в качестве первичных коммутаторов для SOS-генераторов. Таким образом, диссертационная работа является актуальной как с точки зрения практического применения полученных результатов, так и с фундаментальной точки зрения. Достоверность результатов обусловлена тщательным проведением экспериментов, выверенными экспериментальными методиками, подробным и аккуратным сопоставлением результатов экспериментов с численными расчетами, а также успешной апробацией результатов работы на научных семинарах и международных конференциях.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 108 страниц, включая 34 рисунка, 5 таблиц и список литературы из 77 наименований.

Во введении сформулированы цель и основные задачи работы, обоснованы актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту положения, приведено краткое содержание диссертационной работы.

Первая глава диссертации содержит литературный обзор, посвященный современному состоянию исследований задержанного ударно-ионизационного пробоя в высоковольтных p-n переходах диодных и четырехслойных структурах. Обзор включает анализ сложившихся к настоящему времени теоретических представлений и результатов экспериментальных исследований. В фокусе рассмотрения находятся механизмы сверхбыстрого заполнения прибора проводящей плазмой при задержанном лавинном пробое, распространение сверхбыстрой волны ударной ионизации, возможные механизмы генерации затравочных носителей, запускающих пробой в перенапряженном p-n переходе, степень однородности процесса по площади структуры, особенности и возможность реализации этого явления в различных полупроводниковых материалах, таких как арсенид галлия и карбид кремния. Наряду с диодными структурами, известными как диодные обострители, рассмотрены четырехслойные динисторные структуры, в которых имеет место регенеративный механизм и возможность поддерживать проводящее состояние за счет двойной инжекции. Литературный обзор свидетельствует о высоком теоретическом уровне подготовки диссертанта.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию субнаносекундного переключения тиристоров в режиме задержанного ударно-ионизационного пробоя. В начале главы описана экспериментальная установка, методика измерения, а также исследуемые в диссертации серийно выпускаемые отечественной промышленностью кремниевые тиристоры Т343-500 и Т133-320. Отметим, что по своей площади и, соответственно, предельным мощностным характеристикам, эти тиристоры значительно превосходят применяемые в настоящее время в субнаносекундной импульсной электронике FID-динисторы (динисторы с быстрой ионизацией). Показано, что при скорости подачи напряжения более 1 кВ/нс в приборе успешно реализуется субнаносекундное переключение в режиме задержанного ударно-ионизационного пробоя: достигается более чем двукратное перенапряжение прибора (напряжение переключения более 4 кВ при рабочем напряжении 2.0-2.4 кВ), время переключения составляет доли наносекунды, остаточное напряжение несколько сотен вольт. Экспериментально исследованы зависимости основных параметров переключения от скорости роста приложенного напряжения dU/dt в интервале скоростей роста 1.0-6.0 кВ/нс. Установлено, что с ростом dU/dt напряжение переключения увеличивается, а время переключения – уменьшается. Предложены эмпирические аппроксимации для этих зависимостей, а также сделано интересное наблюдение о том, что зависимость напряжения

переключения от времени задержки имеет для исследуемых тиристорных структур «универсальный» вид, совпадающий с точностью до численного коэффициента с известным из классической литературы соотношением для перенапряженных промежутков в газе. Важное фундаментальное значение имеют результаты впервые проведенного систематического экспериментального исследования совместного влияния скорости роста приложенного напряжения и температуры структуры на характер ударно-ионизационного переключения. А именно, во второй главе экспериментально показано, что максимальная температура, при которой возможно сверхбыстрое переключение, существенно увеличивается с ростом dU/dt , и при скорости роста $dU/dt=10$ кВ/нс достигает 180 градусов Цельсия. Экспериментально установлены зависимости времени переключения, напряжения переключения и остаточного напряжения от температуры для разных значений скорости роста приложенного напряжения.

Третья глава диссертации посвящена стадии протекания силового тока в тиристорной структуре, переключение которой осуществлено описанным во второй главе ударно-ионизационным способом. Рассматривается переключение тока с высокой – более 100 кА/мкс – скоростью нарастания при временной протяженности коммутируемых импульсов от единиц до десятков микросекунд. Применялись последовательные сборки из нескольких тириستоров. Для сборки из 9 приборов при разрядном напряжении 20 кВ и длительности импульса на полувысоте 1 мкс была достигнута пиковая мощность в нагрузке 344 МВт при скорости нарастания тока 134 кА/мкс, разрядном напряжении 20 кВ и амплитуде разрядного тока 45 кА. Энергия накопителя при этом составляла 400 Дж. Второй исследованный коммутатор, состоящий из двух тиристоров, обладал энергией емкостного накопителя 12 кДж и обеспечивал максимальную скорость нарастания тока около 60 кА/мкс при максимальной амплитуде тока 200 кА, блокируемом напряжении 5 кВ и длительности импульса на полувысоте 24 мкс. Коммутационный процесс имеет высокую эффективность около 0.9. Разработка данных коммутаторов представляет собой крупное техническое достижение.

Наиболее важный фундаментальный результат третьей главы следует из экспериментального исследования предельных возможностей коммутаторов, на основе которого в диссертации установлена связь между площадью начального включения тиристора в режиме задержанного ударно-ионизационного пробоя и скоростью роста приложенного напряжения dU/dt на стадии запуска. Показано, что максимальная амплитуда тока, которую коммутатор выдерживает без выхода из строя на стадии пропускания силового тока, увеличивается с ростом величины dU/dt на стадии запуска. Такая зависимость может быть объяснена в предположении, что величина активной части площади структуры, которая пропускает силовой ток и формируется на стадии запуска, увеличивается с ростом dU/dt .

Проделанные в диссертации оценочные расчеты показывают, что доля активной площади увеличивается от одной восьмой до одной четверти при увеличении dU/dt от 0.5 до 3 кВ/нс. Эти экспериментальные результаты и их остроумная обработка открывают новые закономерности задержанного ударно-ионизационного пробоя в высоковольтных структурах.

Четвертая глава диссертации посвящена частотному режиму работы рассмотренных в третьей главе тиристорных коммутаторов. Глава начинается анализом возможности применения тиристорных коммутаторов в качестве первичных коммутаторов для SOS-генераторов и замещения ими магнитного компрессора энергии импульса, что представляет собой насущную и актуальную задачу импульсной техники. Исследованы коммутаторы с напряжением емкостного накопителя от 2 до 12 кВ и энергией от 10 до 16 кДж. Показана возможность их работы с разрядным током до 8 кА и скоростью нарастания тока до 54 кА/мкс. Эффективность переключения составляет примерно 0.9. Время восстановления коммутатора составляет 600 мкс. Достигнуты частоты повторения 1 кГц. Экспериментально показана возможность применения специально разработанного тиристорного коммутатора с рабочим напряжением 12 кВ в качестве первичного ключа в SOS-генераторе с энергией и длительностью выходного импульса 10 Дж и 50 нс, имеющим выходное напряжение 300 кВ и пиковую мощность 250 МВт при частоте следования импульсов 1 кГц.

В заключении диссертационной работы приведены основные результаты.

Автором получен целый ряд важных и интересных прикладных и фундаментальных результатов. Среди них следует выделить следующие:

1. Экспериментальное обнаружение субнаносекундного лавинного переключения серийно выпускаемых отечественной промышленностью кремниевых тиристоров в режиме задержанного ударно-ионизационного пробоя.
2. Экспериментальное определение зависимостей основных параметров переключения – времени и напряжения переключения, остаточного напряжения – от скорости роста приложенного напряжения и температуры тиристорной структуры.
3. Экспериментально показано, что максимальная температура структуры, допускающая сверхбыстрое переключение, растет со скоростью роста приложенного напряжения.
4. С помощью анализа экспериментальных данных о предельных возможностях тиристорных коммутаторов на стадии пропускания силового тока сделан вывод о том, что активная часть площади тиристора, на которой происходит включение в

режиме задержанного ударно-ионизационного пробоя, увеличивается при увеличении скорости роста приложенного напряжения.

5. Экспериментально исследована стадия пропускания силового тока амплитудой 10-100 кА при скорости нарастания 100 кА/мкс и микросекундной длительностью импульса в тиристорах, переключаемых в режиме субнаносекундного задержанного ударно-ионизационного пробоя.
6. Созданы эффективные тиристорные коммутаторы с ударно-ионизационным механизмом переключения, обладающие высокой эффективностью.
7. Экспериментально подтверждена возможность работы тиристорных коммутаторов с ударно-ионизационным механизмом переключения в частотных режимах с частотой повторения до 1 кГц.
8. Экспериментально продемонстрирована работа тиристорного коммутатора с ударно-ионизационным механизмом переключения в качестве первичного ключа SOS-генератора в схеме, которая содержит только импульсный трансформатор в качестве силового магнитного элемента. Таким образом, открыт путь к замене магнитных компрессионных устройств тиристорными коммутаторами в мощных импульсных генераторах на основе SOS-диодов.

В качестве замечаний по диссертационной работе А.И. Гусева можно отметить следующее:

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.

Представленные замечания отнюдь не снижают общую высокую положительную оценку диссертационной работы, являющуюся законченным и оригинальным научным исследованием. Полученные результаты являются актуальными, новыми и представляют значительный научный интерес как с фундаментальной, так и с практической точек зрения. Актуальность, новизна, практическая значимость, личный вклад автора и достоверность полученных в работе результатов не вызывают сомнения. Основные результаты диссертационной работы неоднократно обсуждались на научных семинарах, докладывались на международных конференциях самого высокого уровня, опубликованы в статьях в научных изданиях, входящих в список, рекомендованный ВАК РФ. Следует особенно отметить понятное и логически последовательное изложение материала в диссертационной работе. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа А. И. Гусева «Тиристорные переключатели с ударно-ионизационным механизмом переключения» соответствует всем требованиям, предъявляемым Положением ВАК РФ к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени по специальности 01.04.13 – «электрофизика, электрофизические установки».

Официальный оппонент

Ведущий научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук,
доктор физико-математических наук



Павел Борисович Родин

Подпись П.Б. Родина удостоверяю

Ученый секретарь
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук,
доктор физико-математических наук



Адрес официального оппонента:

194021 Санкт-Петербург, ул. Политехническая,
Тел.: 8 (812) 297-22-45
эл. почта: rodin@mail.ioffe.ru

