

На правах рукописи



ГУСЕВ АНТОН ИГОРЕВИЧ

ТИРИСТОРНЫЕ КОММУТАТОРЫ С УДАРНО-ИОНИЗАЦИОННЫМ  
МЕХАНИЗМОМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

Специальность 01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН)

Научный руководитель: **Рукин Сергей Николаевич**,  
доктор технических наук, ИЭФ УрО РАН,  
заведующий лабораторией импульсной  
техники

Официальные оппоненты: **Родин П.Б.**,  
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

**Толбанов О.П.**,  
доктор физико-математических наук,  
профессор, Федеральное государственное  
автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Национальный  
исследовательский Томский  
государственный университет», заведующий  
лабораторией функциональной электроники

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт сильноточной  
электроники Сибирского отделения  
Российской академии наук (ИСЭ СО РАН)

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г. в \_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д 004.024.01 на базе ИЭФ УрО РАН по адресу:  
620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЭФ УрО РАН и на сайте  
<http://www.iep.uran.ru/diss/zased/>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор физико-математических наук

Медведев М.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

В настоящее время мощная импульсная техника широко используется, как в фундаментальных, так и в прикладных научных исследованиях, а также имеет множество технологических применений в промышленности. Данные технологии основаны на применении сильных электрических и магнитных полей, мощных пучков заряженных частиц, лазерного и рентгеновского излучения, а также электрических разрядов в различных средах. Таким образом, развитие мощной импульсной техники и её элементов актуально на сегодняшний день.

Благодаря успехам в изучении полупроводников за последние несколько десятков лет удалось создать полупроводниковые коммутаторы, как замыкающие, так и размыкающие, способные работать в выходных каскадах импульсных генераторов мощностью от  $10^6$  до  $10^9$  Вт. Полупроводниковые коммутаторы обладают более высокими рабочими характеристиками по стабильности выходных параметров, долговечности и частоте следования импульсов по сравнению с другими типами коммутаторов. Таким образом, исследование полупроводниковых коммутаторов способствует развитию мощной импульсной техники и расширению сфер её применения. В данной работе основное внимание уделено мощным замыкающим полупроводниковым коммутаторам.

Механизм формирования задержанной ударно-ионизационной волны в полупроводниках, который экспериментально был обнаружен в 1979 году в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, лёг в основу мощных полупроводниковых приборов, способных коммутировать импульсы тока в нано- и субнаносекундном диапазонах. Обнаружение этого эффекта позволило на несколько порядков величины поднять мощность полупроводниковых генераторов, формирующих короткие импульсы с субнаносекундным фронтом.

В начале 90-х годов в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН были разработаны высоковольтные твердотельные коммутаторы с субнаносекундным временем переключения – FID (Fast Ionization Dynistor). FID представляет собой кремниевую динисторную структуру, в которой формируется и распространяется ударно-ионизационная волна, при этом время перехода коммутатора в проводящее состояние составляет менее 1 нс. Инициирование ударно-ионизационной волны происходит за счет подачи на структуру короткого импульса перенапряжения со скоростью нарастания  $dU/dt > 1$  кВ/нс. На этом же принципе работают высоковольтные твердотельные коммутаторы, которые получили название ДГУ (динисторы с глубокими уровнями). Рабочее напряжение FID и ДГУ лежит в диапазоне 1-10 кВ при коммутируемой мощности в десятки мегаватт, а максимальная скорость нарастания тока может достигать 200 кА/мкс.

Описанные динисторы, являясь уникальными приборами, пока еще не доступны широкому кругу экспериментаторов и разработчиков мощных импульсных устройств. С другой стороны, в литературе указывалось на возможность переключения обычных тиристоров в режиме ударно-

ионизационного фронта, которые, как и динисторы, имеют четырехслойную полупроводниковую структуру. Однако результаты экспериментальных исследований по данному вопросу отсутствуют. Очевидно, что проведение исследований процесса переключения силовых тиристоров в режиме ударно-ионизационной волны, исследование влияния условий запуска тиристоров в таком режиме на коммутационные характеристики тиристоров и создание на этой основе мощных импульсных генераторов представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

### **Цель диссертационной работы**

Цель работы – исследование тиристорных коммутаторов с ударно-ионизационным механизмом переключения. Объектом исследования данной работы являются твердотельные замыкающие коммутаторы на основе тиристорных структур. Предмет исследования – процесс переключения полупроводниковых тиристорных структур в проводящее состояние в режиме ударно-ионизационного фронта с последующим пропусканием через них силового тока. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Экспериментально показать возможность переключения силовых тиристоров с площадью полупроводниковой структуры в единицы и десятки квадратных сантиметров в режиме ударно-ионизационного фронта;
2. Исследовать влияние параметров импульса запуска и температуры полупроводниковой структуры на процесс перехода тиристора в проводящее состояние;
3. Определить влияние параметров импульса запуска на характеристики тиристорного коммутатора на стадии протекания через него силового импульса тока;
4. Провести испытания тиристорного коммутатора в частотном режиме работы при его использовании в качестве коммутатора первичного накопителя энергии мощного импульсного SOS-генератора.

### **Научная новизна**

1. Экспериментально показана возможность запуска серийных кремниевых тиристоров таблеточной конструкции импульсом перенапряжения с коротким фронтом, обеспечивающим процесс переключения тиристора в режиме ударно-ионизационной волны. Установлено, что основным фактором, определяющим характеристики процесса переключения, выступает скорость нарастания напряжения на тиристоре  $dU/dt$ . В частности, увеличение параметра  $dU/dt$  от 1 до 6 кВ/нс при запуске тиристора с диаметром полупроводникового элемента 32 мм и рабочим напряжением 2 кВ приводит к увеличению напряжения включения с ~4,5 до ~7,0 кВ и снижению времени перехода в проводящее состояние с ~500 до ~180 пс.

2. Исследовано совместное влияние температуры и скорости нарастания напряжения на структуре кремниевого тиристора на процесс его переключения. Показано, что температура полупроводниковой структуры,

при которой исчезает ударно-ионизационное переключение тиристора в проводящее состояние, зависит от скорости нарастания напряжения запуска  $dU/dt$ . При  $dU/dt \leq 1$  кВ/нс эффект переключения 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.

3. Установлено, что увеличение скорости нарастания напряжения  $dU/dt$  на стадии запуска тиристора ведет к увеличению проводимости тиристора и снижению потерь энергии в нем на стадии протекания тока. При этом максимальная амплитуда тока, которую тиристор выдерживает без выхода из строя, увеличивается с ростом величины  $dU/dt$ . В частности, начальная проводимость тиристора диаметром 40 мм после его перехода в проводящее состояние увеличивается в  $\sim 20$  раз при увеличении  $dU/dt$  с 0,9 до 5 кВ/нс. Зависимость 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  $dU/dt$ .

4. Показано, что коммутаторы из последовательно соединенных тиристорных таблеточной конструкции с диаметром полупроводникового элемента 40-56 мм при их запуске в режиме ударно-ионизационной волны и последующем прохождении через них тока разряда емкостного накопителя способны работать в следующем диапазоне параметров: емкость накопителя – 0,2 мкФ-1,2 мФ, напряжение накопителя – 2-20 кВ, запасенная энергия – 4 Дж-12 кДж, амплитуда разрядного тока – 4-200 кА, максимальная скорость нарастания тока – 20-130 кА/мкс, длительность импульса тока – 1-25 мкс, мощность импульса в нагрузке – 5-720 МВт, эффективность процесса переключения – 0,85-0,97.

5. Показано, что при коммутации емкостных накопителей с энергией до 16 Дж тиристорные коммутаторы с ударно-ионизационным механизмом переключения имеют время восстановления менее 1 мс и способны работать с частотой следования импульсов до 1 кГц. Ресурсные испытания тиристорного коммутатора при импульсной зарядке емкостного накопителя показали, что тиристоры с диаметром полупроводникового элемента 40 мм не изменяют своих рабочих характеристик после  $\sim 10^6$  включений при пропускании через них тока амплитудой  $\sim 8$  кА, скоростью нарастания  $\sim 17$  кА/мкс и длительностью импульса  $\sim 1,5$  мкс.

### **Практическая значимость**

Проведенные исследования показали, что тиристорные коммутаторы на основе промышленных низкочастотных тиристорных 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 тиристорных коммутаторов работать при зарядном напряжении до 20 кВ, выдерживать без разрушения протекание тока амплитудой до 200 кА и 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. Ресурсные испытания показали, что коммутаторы не изменяют своих рабочих характеристик после  $\sim 10^6$  импульсов.

Полученные результаты имеют большое прикладное значение, поскольку дают возможность широкому кругу экспериментаторов и разработчиков мощных импульсных устройств использовать серийные силовые тиристоры в качестве высокоточных коммутаторов. В первую очередь это относится к технике генерирования мощных импульсных токов микро- и субмикросекундного диапазона, где коммутатор должен обеспечивать высокие значения амплитуды импульса тока (десятки и сотни килоампер) и скорости его нарастания (десятки и сотни килоампер в микросекунду).

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.

#### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. Кремниевые тиристоры таблеточной конструкции с диаметром полупроводникового элемента от 32 до 56 мм переключаются в проводящее состояние за время менее 1 нс при возбуждении и распространении в них ударно-ионизационного фронта, инициируемого подачей на основные электроды импульса запуска со скоростью нарастания напряжения  $dU/dt \geq 1$  кВ/нс. Основным фактором, определяющим характеристики процесса переключения, выступает величина  $dU/dt$ , увеличение которой с 1 до 6 кВ/нс увеличивает напряжение переключения и снижает время перехода тиристора в проводящее состояние с  $\sim 500$  до  $\sim 180$  пс.

2. Температура полупроводниковой структуры, при которой исчезает ударно-ионизационное переключение тиристора в проводящее состояние, зависит от скорости нарастания напряжения запуска  $dU/dt$ . При  $dU/dt \leq 1$  кВ/нс эффект переключения 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.

3. С ростом величины  $dU/dt$  на стадии запуска увеличивается проводимость тиристора на стадии протекания тока, что приводит к снижению потерь энергии в тиристоре и увеличению максимальной амплитуды тока, которую тиристор выдерживает без выхода из строя. В частности, начальная проводимость тиристора диаметром 40 мм после его перехода в проводящее состояние увеличивается в  $\sim 20$  раз при увеличении  $dU/dt$  с 0,9 до 5 кВ/нс. 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  $dU/dt$ .

4. Коммутаторы из последовательно соединенных тиристоров таблеточной конструкции с диаметром полупроводникового элемента 40-56 мм при их запуске в режиме ударно-ионизационной волны и последующем прохождении через них тока разряда емкостного накопителя способны работать в следующем диапазоне параметров: зарядное напряжение – 2-20 кВ, коммутируемая энергия – 4 Дж-12 кДж, амплитуда разрядного тока – 4-200 кА, скорость нарастания тока – до 130 кА/мкс, длительность импульса тока – 0,5-25 мкс, эффективность процесса переключения – 0.85-0.97.

#### **Апробация работы**

Результаты, полученные в рамках диссертационной работы, были представлены на научных семинарах в следующих организациях:

1. Институте электрофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИЭФ УрО РАН), г. Екатеринбург
2. Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), г. Санкт Петербург
3. Институте сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭ СО РАН), г. Томск

Кроме того, были представлены доклады на международных симпозиумах и конференциях: 18-й и 19-й симпозиуме по сильноточной электронике (ISHCE-2014, 2016); конференции IEEE по импульсным модуляторам и высоковольтной технике (IPMHVC-2014, 2016); 21-й конференции IEEE по мощной импульсной технике (PPC-2017).

#### **Публикации**

Материалы диссертации опубликованы в 12 работах, из них 8 статей в рецензируемых журналах и 4 статьи в сборниках трудов международных конференций.

#### **Методы диссертационного исследования**

Для решения поставленных задач проведены экспериментальные исследования процесса переключения кремниевых тиристоров при возбуждении в них ударно-ионизационной волны. В работе были использованы современные методики и аппаратура для измерения параметров быстропротекающих процессов.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 108 страниц, включая 34 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 77 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель и основные задачи работы, показана научная новизна полученных результатов. Представлены положения, выносимые на защиту, а также структура и объём диссертации.

В первой главе приводится обзор литературы, посвящённой процессам субнаносекундного переключения различных полупроводниковых структур и приборам на их основе. Рассмотрен инжекционный механизм переключения, при котором время коммутации силовых приборов принципиально не может быть меньше нескольких наносекунд.

Существенная часть главы посвящена процессам формирования быстрого ударно-ионизационного фронта в обратно смещённом кремниевом  $p-n$ -переходе под воздействием быстро нарастающего ( $\sim 1$  кВ/нс) импульса перенапряжения. Данный эффект был обнаружен в 1979 г. в Физико-техническом институте им. Иоффе И.В. Греховым с коллегами. В хронологическом порядке рассматривается развитие представлений о физической природе эффекта формирования быстрого ударно-ионизационного фронта. Отмечено, что эффект ударно ионизационного переключения пропадает при температуре свыше  $\sim 80$  °С, согласно литературным источникам. Однако в литературе нет данных о влиянии температуры при различных условиях запуска. Неизвестно, как изменится критическая температура, если существенно повысить или понизить скорость нарастания напряжения импульса запуска  $dU/dt$ , тем самым изменив начальные условия формирования ударно-ионизационного фронта. Рассмотрен принцип действия и коммутационные параметры приборов с запуском в режиме ударно-ионизационной волны (динисторы с быстрой ионизацией – д.б.и. или Fast Ionization Dynistors – FID). Рассмотрены работы по возбуждению ударно-ионизационной волны в SiC, GaAs с указанием особенностей материалов. На сегодняшний день остается открытым вопрос о площади включения приборов с ударно-ионизационным механизмом переключения. Приведены свидетельства как однородного, так и филаментарного характера включения полупроводниковой структуры. Указано на возможность переключения серийных тиристоров в режиме ударно-ионизационного фронта, которые, как и динисторы, имеют четырехслойную полупроводниковую структуру. 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.

Вторая глава посвящена стадии переключения серийных тиристоров большой площади ( $\sim 10$  см<sup>2</sup>) в проводящее состояние за счёт распространения ударно-ионизационной волны без последующего протекания разрядного тока от внешней схемы. При проведении исследований были использованы промышленные кремниевые тиристоры таблеточной конструкции производства ЗАО «Протон-Электротекс». Диаметр полупроводникового



элемента составлял 32 и 40 мм, класс по напряжению 20-24. Критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии при их запуске стандартным методом – импульсом тока через управляющий электрод – не превышала 0,4 кА/мкс для всех исследуемых тиристорov. Тиристоры исследовались как в корпусе, так и без него. Возбуждение ударно-ионизационного фронта в тиристорах осуществлялось за счёт подачи импульса перенапряжения наносекундной длительности на основные электроды тиристорov. В качестве источника такого импульса был использован компактный твердотельный генератор. Амплитуда импульса на выходе генератора при работе на нагрузку 50 Ом составляла от 50 до 100 кВ, фронт по уровню 0,1-0,9 от амплитуды ~1 нс, длительность импульса на полувысоте ~2,5 нс, по основанию - около 5 нс.

Процесс переключения тиристорov в проводящее состояние регистрировался с помощью резистивного делителя напряжения, собственное время нарастания которого составляло ~170 пс по уровню 0,1-0,9 от амплитуды. Постоянная времени делителя составляла ~340 нс, при этом исследовались процессы длительностью не более 4 нс. Для исключения влияния индуктивности корпуса тиристора, полупроводниковые элементы извлекались из корпуса, а делитель напряжения подключался непосредственно к контактам полупроводниковой пластины.

Исследовалось влияние скорости нарастания напряжения, для чего к основным электродам тиристора (анод и катод) прикладывался импульс напряжения наносекундной длительности, обеспечивающий скорость нарастания напряжения на тиристоре  $dU/dt$  в диапазоне 0,5-6,0 кВ/нс. Величина начального напряжения смещения  $U_0$  составляла 2 кВ и не изменялась. Результаты экспериментов в графическом виде представлены на рисунках 1 и 2.

Для всех экспериментальных точек произведение  $(\Delta U)^2 \cdot t_r$  близко к постоянной величине, что позволяет записать эмпирическое соотношение:

$$U_m = U_0 + (a_{32,40} t_r)^{1/2}, \quad (1)$$

где постоянная  $a$  имеет значение  $a_{32} = 21,54 \text{ кВ}^2 \text{ нс}$ , а для тиристора диаметром 40 мм  $a_{40} = 12,6 \text{ кВ}^2 \text{ нс}$ . На рисунке 1 зависимости (1) представлены штриховыми линиями. Здесь же приведены результаты численного расчета. Описание расчетной модели выходит за рамки настоящей диссертационной работы. Разработка модели и проведение численных расчетов были выполнены Цырановым С.Н.

Зависимости  $U_m$  от  $t_r$  (рисунок 1) отражают общую закономерность процесса пробоя всех диэлектрических сред – увеличение пробивного напряжения при сокращении длительности воздействующего импульса перенапряжения. Хотя физические процессы пробоя диэлектриков различаются в разных средах, соотношения, описывающие эти явления, могут быть схожими. В частности, эмпирическое соотношение (1), полученное в настоящей работе, с точностью до коэффициентов совпадает с эмпирическим соотношением, полученным при исследовании пробоя перенапряженных промежутков в газе.

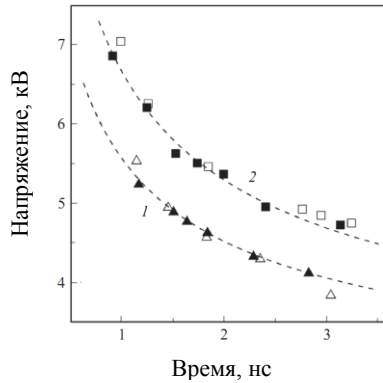


Рисунок 1 – Зависимость максимального напряжения от времени его достижения для тиристора диаметром 40 мм (1) и 32 мм (2). Темные символы – экспериментальные точки, светлые символы – численный расчет, пунктирные кривые – по формуле (1)

На рисунке 2 (а) показано влияние скорости нарастания напряжения  $dU/dt$  на тиристоре на напряжение переключения  $U_m$ . Принимая  $dU/dt = \Delta U/t_r$ , из (1) получаем соответствующее соотношение:

$$U_m = U_0 + (a_{32,40} \cdot dU/dt)^{1/3}. \quad (2)$$

Рисунок 2 (б) иллюстрирует зависимость времени переключения от скорости нарастания напряжения на тиристоре. Эмпирическое соотношение записывается в виде:

$$t_s = b_s (U_m - U_0)^2 / (dU/dt) U_m. \quad (3)$$

Анализ экспериментальных данных также показал, что отношение времени нарастания напряжения ко времени переключения  $t_r/t_s$  не зависит от диаметра тиристора и удельного сопротивления исходного кремния и слабо изменяется с ростом величины напряжения переключения.

Тиристор диаметром 32 мм ( $\rho = 110-120 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ) при одних и тех же значениях  $t_r$  (рисунок 1) и  $dU/dt$  (рисунок 2 (а)) имеет на  $\sim(10-20)\%$  более высокие экспериментальные значения  $U_m$ , чем тиристор диаметром 40 мм ( $\rho = 80-85 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ). Поскольку в тиристоре с увеличенным удельным сопротивлением поле в структуре распределяется более однородно, то для его пробоя требуется большее напряжение. Это подтверждается и численным расчетом.

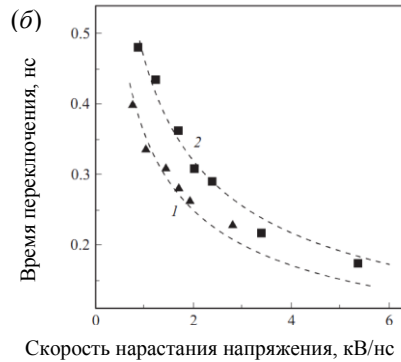
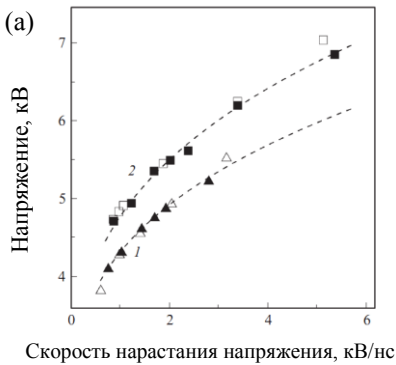


Рисунок 2 – зависимость максимального напряжения от скорости роста напряжения (а) на тиристоре диаметром 40 (1) и 32мм (2). Темные символы – экспериментальные точки, светлые символы – численный расчет, пунктирные кривые – формула (2); зависимость времени переключения от скорости роста напряжения (б) на тиристоре диаметром 40 (1) и 32 мм (2). Символы – экспериментальные точки, пунктирные кривые – расчёт по формуле (3)

Представлены результаты исследований по совместному влиянию скорости нарастания напряжения  $dU/dt$  и температуры  $T$  на процесс коммутации кремниевых тиристоров за счёт возбуждения в них ударно-ионизационного фронта. В эксперименте использовались низкочастотные кремниевые тиристоры таблеточной конструкции T133-320-22. Внешний нагреватель позволял повышать температуру тиристора от комнатной температуры 25 °С до 180 °С.

На рисунке 3 показано совместное влияние величины  $dU/dt$  и температуры структуры на процесс переключения тиристора. При низкой скорости нарастания напряжения (0,8 кВ/нс, рисунок 3 (а)) при температурах ниже 100 °С структура работает как коммутатор с низким уровнем остаточного напряжения (кривые 1 и 2). Однако, при дальнейшем повышении температуры (кривые 3-5) эффект волнового переключения исчезает.

Картина изменяется кардинальным образом при переходе к более высоким значениям  $dU/dt$ . Так, при  $dU/dt \sim 4$  кВ/нс структура переключается в режиме волны ударной ионизации вплоть до температуры 175 °С (рисунок 3 (б)). Колебания напряжения на осциллограммах после быстрого (субнаносекундного) перехода тиристора в проводящее состояние, наложенные на уровень остаточного напряжения, не связаны с процессами, происходящими внутри полупроводниковой структуры. Колебания обусловлены паразитными L-С параметрами системы измерения.

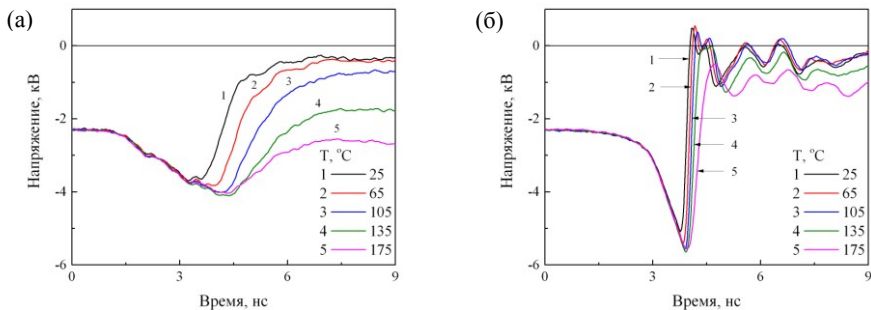


Рисунок 3 – Осциллограммы напряжения на тиристоре в ходе процесса переключения при различных температурах:  $dU/dt = 0,8$  кВ/нс (а) и  $4,0$  кВ/нс (б)

При низких значениях  $dU/dt \leq 1$  кВ/нс и, соответственно, низком электрическом поле с ростом температуры структуры интенсивность процессов ударной ионизации снижается и становится недостаточной для образования электронно-дырочной плазмы с концентрацией, позволяющей экранировать внешнее электрическое поле. В этом случае волна ударной ионизации не возбуждается, а структура переходит в режим работы лавинного ограничителя. При увеличении  $dU/dt$  происходит рост электрического поля в структуре, которое компенсирует снижение интенсивности процессов ударной ионизации с ростом температуры. Концентрация плазмы, нарабатанной процессами ударной ионизации, становится достаточной для экранирования внешнего электрического поля, что является необходимым условием для возбуждения в структуре ударно-ионизационной волны.

Таким образом, экспериментально показана возможность запуска серийных кремниевых тиристоров таблеточной конструкции большой площади импульсом перенапряжения с коротким фронтом, обеспечивающим процесс переключения тиристора в режиме ударно-ионизационной волны, а основным фактором, определяющим характеристики процесса переключения, выступает скорость нарастания напряжения на тиристоре  $dU/dt$ . Увеличение параметра  $dU/dt$  от 1 до 6 кВ/нс при запуске тиристора с диаметром полупроводникового элемента 32 мм и рабочим напряжением 2 кВ приводит к увеличению напряжения включения с  $\sim 4,5$  до  $\sim 7,0$  кВ и снижению времени перехода в проводящее состояние с  $\sim 500$  до  $\sim 180$  пс.

Совместное влияние температуры тиристора и скорости нарастания напряжения  $dU/dt$  на процесс переключения было изучено на примере тиристора с диаметром структуры 32 мм. Показано, что температура полупроводниковой структуры, при которой исчезает ударно-ионизационное переключение тиристора, зависит от скорости нарастания напряжения запуска  $dU/dt$ . При  $dU/dt \leq 1$  кВ/нс эффект переключения 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.

**Третья глава** посвящена исследованию тиристорных коммутаторов с ударно-ионизационным механизмом запуска на стадии протекания силового тока. Электрическая схема экспериментальной установки приведена на рисунке 4. Исследовались тиристоры таблеточной конструкции с диаметром структуры 40 и 56 мм с рабочим напряжением 2,0-2,4 кВ производства ЗАО «Протон-Электротекс». Приводятся результаты экспериментов, как с одиночным тиристором, так и с последовательными сборками тиристоров в количестве до 9 штук.

Длительность спада напряжения на тиристоре при переходе в проводящее состояние составляет  $\sim 240$  пс и близка к собственному времени нарастания сигнала в измерительной системе. С учетом полосы пропускания системы регистрации, собственное время переключения исследованных структур в условиях настоящего эксперимента не превышало 200 пс. Полагая, что перед включением структуры электрическое поле занимает всю ширину базовых областей, (340-400 мкм), а время заполнения этих областей плазмой составляет 200 пс, средняя скорость движения волны составит  $1,7-2,0 \cdot 10^8$  см/с, что в 17-20 раз превышает насыщенную скорость движения носителей в кремнии ( $10^7$  см/с).

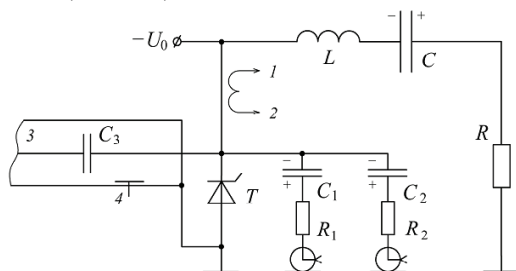


Рисунок 4 – Электрическая схема. Т – исследуемый тиристор; С – накопитель энергии,  $C_1, C_2, C_3$  – разделительные конденсаторы; R – нагрузка,  $R_1, R_2$  – высоковольтное плечо делителя напряжения; L – индуктивность разрядного контура; 1–2 – пояс Роговского; 3 – выход генератора импульсов запуска; 4 – емкостный датчик

В экспериментах со сборками тиристоров управляющие электроды оставались разомкнутыми. Импульс запуска подавался на всю сборку из последовательно соединенных тиристоров. Ток разряда регистрировался с помощью пояса Роговского, а делители напряжения подключались параллельно только одному из тиристоров в сборке, анод которого был заземлен. Величина потерь энергии, полученная для этого тиристора, умножалась на количество тиристоров для определения суммарных потерь энергии. При расчете потерь энергии учитывалась индуктивная компонента падения напряжения на тиристоре. На рисунке 5 приведены осциллограммы тока, напряжения и мощности потерь при максимальных параметрах тиристорного коммутатора, достигнутых на данном стенде.

Максимальные параметры были достигнуты в сборке из 9 тиристоров при зарядном напряжении 20 кВ: амплитуда разрядного тока – 45 кА, начальная скорость нарастания тока – 134 кА/мкс, длительность импульса на полувысоте – 1 мкс, пиковая мощность в нагрузке – 344 МВт. Эффективность переключения в исследованных режимах работы 0,85. Эксперименты проводились в режиме одиночных импульсов (1 импульс за ~10 секунд). Перевод такого переключателя в частотный режим работы потребует обычных конструктивных решений – каждый тиристор в сборке может быть снабжен индивидуальным охладителем с прокачкой через него охлаждающей жидкости.

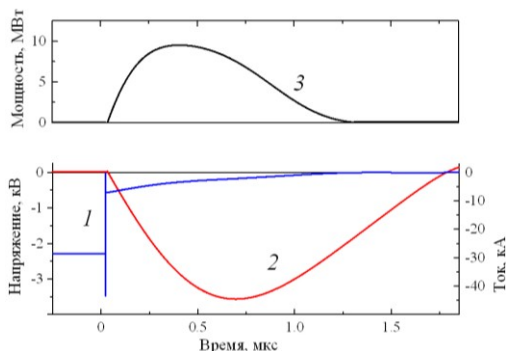


Рисунок 5 – Осциллограммы напряжения (1), тока (2) и мощности потерь (3) для одного тиристора Т343-500-20 с диаметром структуры 40 мм (последовательная сборка из 9 тиристоров, зарядное напряжение 20 кВ)

Приведены результаты экспериментов по коммутации кремниевым тиристором большой площади импульсов тока микросекундного диапазона с амплитудой более 200 кА и запасаемой энергии накопителя более 10 кДж в режиме ударно-ионизационного фронта. В этом эксперименте исследовался тиристорный коммутатор, состоящий из двух последовательно соединённых промышленных тиристоров Т453-800-24 таблеточной конструкции. Блокируемое напряжение тиристора составляет 2,4 кВ, критическая скорость нарастания тока – 400 А/мкс, диаметр кремниевой пластины равен 56 мм.

В данном эксперименте тиристорный коммутатор запускался в режиме ударно-ионизационной волны с различными значениями скорости нарастания пускового напряжения  $dU/dt$  от 0,5 до 3,0 кВ/нс. Для трех фиксированных режимов запуска, амплитуда тока через коммутатор увеличивалась до значения, при котором происходил выход тиристоров из строя (далее – ток пробоя  $I_{br}$ ). Эксперименты показали, что  $I_{br}$  зависит от скорости нарастания напряжения  $dU/dt$  на стадии запуска. Увеличение  $dU/dt$  при запуске коммутатора от 0,5 до 3,0 кВ/нс в расчете на один тиристор приводило к возрастанию тока пробоя  $I_{br}$  от 145 до 220 кА (кривая 2 на рисунке 6) и почти двукратному увеличению выделяющейся в тиристоре энергии  $W_T$  – от 112 до 212 Дж (кривая 3).

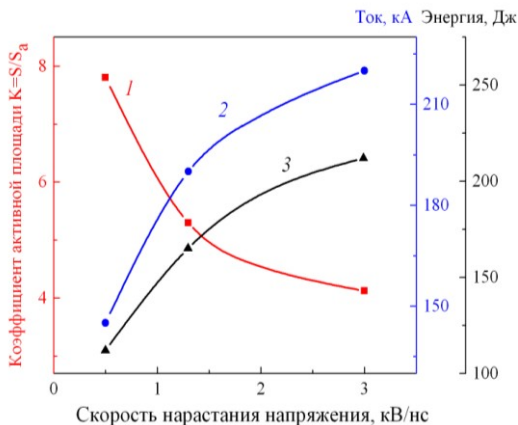


Рисунок 6 – Зависимости коэффициента активной площади структуры тиристора  $K = S/S_a$  (1), амплитуды тока пробоя  $I_{br}$  (2) и энергии потерь в тиристоре  $W_T$  (3) от скорости нарастания напряжения на тиристоре

Полагая, что при всех экспериментальных значениях  $dU/dt$  выход тиристоров из строя обусловлен возрастанием температуры структуры до критической величины  $T_{cr} \sim 500$  °С, полученную зависимость тока пробоя  $I_{br}$  от  $dU/dt$  можно объяснить тем, что ток проходит не по всей площади структуры, а только по ее части. При этом активная часть площади, по которой проходит ток, формируется на стадии запуска тиристоров и увеличивается с ростом  $dU/dt$ .

Для трех значений  $dU/dt$  были рассчитаны значения энергии  $W_T$ , выделившейся в структуре тиристора, и соответствующие значения приращения температуры  $\Delta T$  в предположении, что выделение тепла происходит однородно по всей площади структуры. Коэффициент  $K$ , равный отношению полной площади структуры  $S$  к площади ее активной части  $S_a$ , находится из соотношения:

$$\Delta T \cdot S = (T_{cr} - T_0) \cdot S_a, \quad (4)$$

где  $T_0 = 25$ °С – начальная температура структуры. Полученные значения коэффициента  $K$  графически представлены на рисунке 6 (кривая 1).

Полученный результат согласуется с результатами численного моделирования, где было показано, что величина активной площади структуры, через которую проходит ток переключения, зависит от параметра  $dU/dt$  определенным образом. А именно, с ростом величины  $dU/dt$  происходит увеличение активной площади структуры. Механизм влияния величины  $dU/dt$  на активную площадь структуры тиристора можно объяснить тем, что процесс возбуждения ударно-ионизационной волны может быть изначально неоднороден по площади в силу разброса параметров материала структуры. При невысоких значениях  $dU/dt$  и, соответственно, низких

значениях электрического поля в структуре возникновение плазменных образований, формирующих плазменные каналы, в первую очередь происходит в участках структуры с пониженной электрической прочностью и в участках, где поле превышает среднее значение. С ростом величины  $dU/dt$  и соответственным увеличении напряжения переключения происходит как расширение слоя структуры, в котором электрическое поле выше пробивного, так и возрастание средней величины поля в слое. При этом в процесс ионизации вовлекается все большее количество участков структуры, увеличивая число плазменных каналов и активную площадь структуры в процессе переключения.

Для оценки надежности работы коммутатора в безопасном режиме при токах ниже пробивного значения емкостный накопитель с суммарной емкостью модулей  $\sim 1$  мФ и зарядным напряжением  $U_0 = 5$  кВ был настроен на амплитуду тока 200 кА при разряде на резистивную нагрузку 18 мОм. Для запуска коммутатора использовался импульс с  $dU/dt = 3$  кВ/нс. Параметры разрядного процесса: начальная скорость нарастания тока 58 кА/мкс, длительность импульса на полувысоте 25 мкс, фронта – 5,5 мкс (уровень 0,1-0,9 от амплитуды), эффективность переключения  $\eta = 1 - W_T/W_C = 0,97$ . После 100 включений коммутатора деградации тиристоров не обнаружено.

Исследовано влияние  $dU/dt$  на процесс коммутации и стадию протекания тока без разрушения тиристоров. В экспериментах с пропуском разрядного тока через тиристор Т143-400-24 емкостной накопитель С1 имел емкость 5,3 мкФ, что при зарядном напряжении  $U_0 = 2$  кВ соответствовало запасенной энергии  $W_{C1} = 10,6$  Дж. При запуске тиристора накопитель С1 разряжался на конденсатор С2 через импульсный трансформатор РТ за время  $\sim 1,9$  мкс импульсом тока амплитудой  $\sim 6$  кА и начальным значением  $dI/dt \sim 14$  кА/мкс. Величина  $dU/dt$  при запуске тиристора изменялась в диапазоне 0,6-5,0 кВ/нс.

На рисунке 7 изображена зависимость проводимости тиристора от скорости нарастания напряжения  $dU/dt$  в разные моменты времени. Проводимость  $G_0$  получена в момент максимального напряжения на тиристоре и соответствует минимальной проводимости ключа. Начальная проводимость тиристора  $G_0$  после его перехода в проводящее состояние увеличивается в  $\sim 20$  раз при увеличении  $dU/dt$  с 0,9 до 5 кВ/нс. Полученную зависимость снижения проводимости и увеличения падения напряжения на тиристоре при снижении скорости нарастания запускающего напряжения можно также объяснить тем, что разрядный ток проходит не по всей площади структуры, а только по ее части. При этом активная часть площади, по которой проходит ток, формируется на стадии запуска тиристора и увеличивается с ростом  $dU/dt$ .

Описанные выше результаты, показывают, что при разработке тиристорного коммутатора с ударно-ионизационным механизмом запуска для снижения потерь энергии в ключе необходимо выбирать скорость нарастания запускающего напряжения не менее 2-3 кВ/нс.



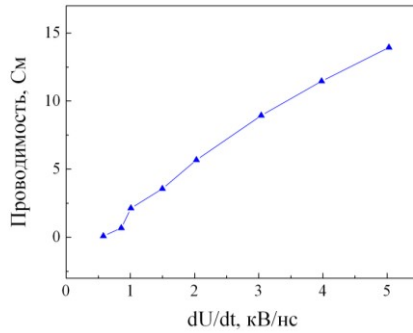


Рисунок 7 – Зависимость проводимости  $G_0$  в начальный момент времени для тиристора Т143-400-24 от скорости нарастания напряжения  $dU/dt$

**В четвёртой главе** рассматриваются вопросы практического применения тиристорных коммутаторов с ударно-ионизационным механизмом переключения. Особенностью работы SOS-диодов является ограничение длительности протекания тока накачки через прибор из-за процессов рекомбинации носителей заряда в полупроводниковой структуре. Это ограничивает максимальные параметры выходного импульса по энергии и мощности; а также требует введения в схему SOS-генератора дополнительного устройства – магнитного компрессора энергии импульса (МК). Использование многоступенчатой системы компрессии энергии приводит к снижению эффективности SOS-генератора, типичные значения эффективности SOS-генераторов при выходном напряжении в сотни киловольт лежат в диапазоне 0,2-0,4. Кроме того, МК в значительной степени определяет габариты и массу SOS-генератора. Решением проблемы является использование схемы SOS-генератора с одним магнитным элементом (рисунок 8). Однако использование такой схемы при энергии импульса более 10 Дж ограничено возможностями первичного коммутатора. Для реализации SOS-генератора с одним магнитным элементом при энергии импульса более 10 Дж необходим твердотельный коммутатор с рабочим напряжением  $\sim 10$  кВ, амплитудой коммутируемого тока  $\sim 10$  кА и  $dl/dt \sim 100$  кА/мкс.

В исследуемом тиристорном коммутаторе TS используются низкочастотные тиристоры таблеточной конструкции марки Т343-500-24 производства ЗАО "Протон-Электротекс". Основные характеристики тиристора: рабочее напряжение – 2,4 кВ (класс по напряжению – 24), напряжение стационарного пробоя  $\sim 3$  кВ, амплитуда ударного тока – 8-10 кА, критическая скорость нарастания тока при включении по управляющему электроду – 0,4 кА/мкс, диаметр полупроводникового элемента – 40 мм. В экспериментах в зависимости от поставленных задач исследованы три варианта коммутатора TS: 2-кВ – одиночный тиристор, 4-кВ – два тиристора последовательно и 12-кВ – 6 тиристоров, соединенных последовательно. Импульс запуска подавался на полную тиристорную сборку. Управляющие электроды тиристоров оставались разомкнутыми.

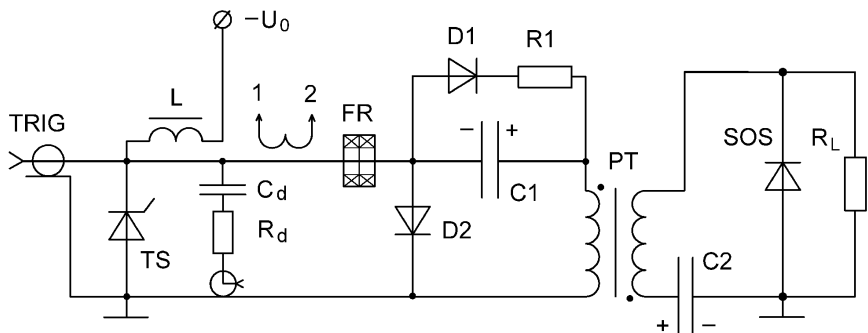


Рисунок 8 – Упрощённая схема экспериментальной установки: TS – исследуемый тиристорный коммутатор; L – зарядный дроссель; ( $C_d$ – $R_d$ ) – элементы делителя напряжения; (1–2) – пояс Роговского; FR – ферритовые кольца; C1 – первичный емкостной накопитель энергии; (D1–R1, D2) – защитные элементы; PT – импульсный трансформатор; C2 – конденсатор накачки; SOS – полупроводниковый прерыватель тока;  $R_L$  – резистивная нагрузка

В экспериментах с 4-кВ ключом определено время восстановления коммутатора  $t_{rec} = 600$  мкс при различном начальном напряжении  $U_0$  в диапазоне 1-4 кВ. Исследован частотный режим работы коммутатора с частотой следования импульсов до 1 кГц. При начальном напряжении  $U_0 = 4$  кВ и коммутируемой энергии 16 Дж амплитуда разрядного тока составила 8 кА с максимальной скоростью нарастания 17 кА/мкс. Проведена оценка рабочего ресурса тиристорного коммутатора в данном режиме. В ходе экспериментов суммарно было произведено  $\sim 10^6$  импульсов в различных режимах по частоте следования и длительности пачки, при этом деградации тиристоров не наблюдалось. Другими словами, ток утечки тиристоров при номинальном напряжении оставался неизменным на протяжении всей серии экспериментов. Было исследовано влияние начального напряжения смещения  $U_0$  для определения диапазона управляемой работы коммутатора. При изменении начального напряжения коммутатора  $U_0$  от 1 до 4 кВ, время перехода коммутатора в проводящее состояние слабо зависит от величины  $U_0$  и лежит в диапазоне 400-450 пс. Это свидетельствует о возможности использования данного коммутатора в широком диапазоне рабочих напряжений.

Заключительным этапом работы стало создание SOS-генератора с тиристорным ударно-ионизационным коммутатором в первичном контуре. Принципиальная электрическая схема генератора приведена на рисунке 8. Измеренные значения емкости конденсаторов составили  $C1 = 0,22$  мкФ и  $C2 = 0,6$  нФ. Первичная обмотка трансформатора PT содержала 1 виток, вторичная – 20 витков. Зарядное напряжение на тиристорном ключе составляло 12 кВ (запасенная энергия в C1  $\sim 16$  Дж). Индуктивность контура

передачи энергии из C1 в C2, определенная в опытах короткого замыкания нагрузки генератора, составила  $\sim 220$  нГн, что при напряжении 12 кВ соответствовало начальной скорости нарастания тока в тиристорном ключе  $\sim 54$  кА/мкс.

Тиристорный коммутатор представлял собой 6 последовательно соединённых таблеточных тиристоров марки Т343-500-24. Тиристоры были зажаты с рекомендуемым производителем осевым усилием  $\sim 20$  кН. Для равномерного распределения зарядного напряжения  $U_0$  по тиристорам параллельно каждому тиристоры в сборке подключался резистор сопротивлением 10 кОм.

Все основные процессы в SOS-генераторе с одним магнитным элементом иллюстрирует рисунок 9. Амплитуда импульса тока 12-кВ ключа около 7,2 кА, начальная скорость нарастания тока  $\sim 54$  кА/мкс, время передачи энергии до начала процесса насыщения сердечника трансформатора РТ составляет около 490 нс. Осциллограмма напряжения (кривая 1 на рисунке 9) обработана с вычетом индуктивной компоненты падения напряжения. Сопротивление ключа к моменту максимума разрядного тока падает до  $\sim 60$  мОм. При  $dU/dt \sim 2,5$  кВ/нс потери энергии в ключе  $W_{TS}$  составляют  $\sim 1,2$  Дж, при этом эффективность переключения – 0,92. Осциллограммы тока через SOS и напряжения приведены для нагрузки  $R_L = 215 \Omega$ , при которой достигается максимальная импульсная мощность генератора. Длительность импульса тока прямой накачки SOS составляет  $\sim 470$  нс, обратной – около 65 нс, амплитуда тока прямой накачки близка к 400 А, величина обрываемого тока – около 1,7 кА, а время обрыва тока, измеренное по уровню 0,1–0,9 от амплитуды, составляет  $\sim 15$  нс. Максимальное напряжение на выходе генератора было получено при  $R_L = 500 \Omega$  и составило  $\sim 300$  кВ.

Приведены результаты исследования эффективности тиристорного коммутатора и всего SOS генератора при изменении скорости нарастания запускающего напряжения  $dU/dt$ . При увеличении скорости нарастания напряжения на этапе запуска с 0,9 до 2,5 кВ/нс потери в тиристорном коммутаторе сокращались с 1,7 до 1,2 Дж. При запасённой энергии  $W_{Cl} = 15,8$  Дж эффективность коммутатора возросла с 0,89 до 0,92, а общая эффективность SOS-генератора – от 0,57 до 0,65. При введении дополнительной схемы рекуперации энергии, эффективность работы SOS-генератора возможно повысить до 0,7.

Максимальные значения мощности и энергии импульса были получены при нагрузке  $R_L = 215 \Omega$ . Амплитуда импульса напряжения на этом резисторе составляет 232 кВ, пиковая мощность – 250 МВт, длительность импульса на полувывоте  $\sim 50$  нс и энергия импульса – 10,2 Дж. Для проверки надёжности работы тиристорного коммутатора в данном режиме работы были проведены испытания SOS генератора в частотном режиме. Частота следования импульсов составляла 50 Гц в непрерывном режиме и 1 кГц в режиме пачки импульсов длительностью до 1 с.

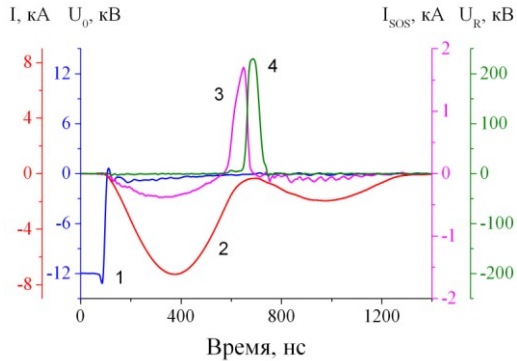


Рисунок 9 – Осциллограммы напряжения  $U_0$  (кривая 1) и тока  $I$  (кривая 2) для 12-кВ тиристорного коммутатора; тока SOS  $I_{SOS}$  (кривая 3) и напряжения  $U_R$  на нагрузке  $R_L = 215 \Omega$  (кривая 4)

На рисунке 10 показано напряжение на коммутаторе и процесс зарядки конденсатора  $C1$ . Вверху изображена пачка импульсов с частотой следования 1 кГц, внизу – один импульс из этой пачки на более быстрой развертке по времени. В этом режиме использовался импульсный зарядный источник, обеспечивающий зарядку накопителя  $C1$  за время  $\sim 75$  мкс. Внешний генератор подавал запускающий импульс на тиристорный коммутатор спустя 40 мкс после достижения зарядного напряжения на нём. Выходная средняя мощность генератора на частоте 1 кГц составляла 8,5–9,0 кВт. При исследовании 12-кВ коммутатора признаков деградации тиристоров также не было выявлено.

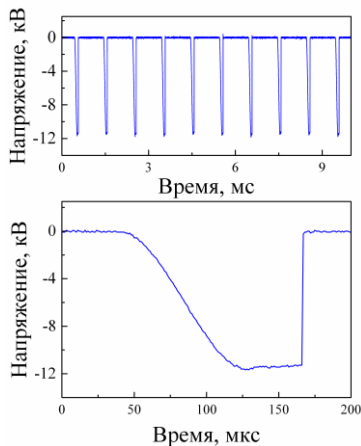


Рисунок 10 – Напряжение на 12-кВ коммутаторе в частотном режиме работы с частотой следования импульсов 1 кГц и длительностью пачки 1 с (вверху – пачка импульсов, внизу – одиночный импульс)

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие результаты:

1. В ходе обзора литературы в области полупроводниковых коммутаторов с ударно-ионизационным механизмом переключения выявлены положения, не имеющие на сегодняшний день установившейся точки зрения. В частности, требуют дополнительных исследований следующие вопросы: формирование начальной (активной) площади включения, переключение полупроводниковых структур большой площади (диаметр  $>40$  мм), влияние температуры на процесс переключения, деградация структур в частотном режиме и некоторые другие.
2. 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.
3. 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. 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 запускающего напряжения  $dU/dt$ .
4. 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.
5. 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. Длительности импульса тока на полувывоте имеет величину  $\sim 1$  мкс, энергия емкостного накопителя – 400 Дж. Второй коммутатор состоит из двух последовательно соединённых 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 полувывоте 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.

6. 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 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  $dU/dt$ .
7. 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 T143-400-24 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  $\sim 20$  раз при увеличении  $dU/dt$  с 0,9 до 5 кВ/нс.
8. Для 4-кВ ключа на основе двух тиристорov T343-500-24, соединенных последовательно, показано, что начальное напряжение слабо влияет на параметры коммутации и время восстановления тиристорov. При коммутируемом импульсе тока амплитудой  $\sim 8$  кА, длительностью  $\sim 1,5$  мкс и  $dl/dt \sim 17$  кА/мкс проведена оценка времени восстановления коммутатора, которое составило  $\sim 600$  мкс. Проведены ресурсные испытания 4-кВ ключа в частотном режиме работы, которые показали возможность длительной эксплуатации коммутатора. После  $10^6$  импульсов изменений характеристик тиристорov не обнаружено.
9. На основе тиристорov T343-500-24 разработан тиристорный коммутатор с рабочим напряжением 12 кВ (шесть тиристорov, 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  $\sim 500$  нс и скоростью нарастания  $\sim 54$  кА/мкс. SOS-генератор имеет выходное напряжение до 300 кВ и пиковую мощность до 250 МВт при длительности импульса  $\sim 50$  нс и энергии выходного импульса  $\sim 10$  Дж. В режиме пачки импульсов продемонстрирована работа генератора с частотой следования импульсов 1 кГц в режиме пачки импульсов. Эффективность разработанного SOS-генератора составляет 0,65 и может быть увеличена до 0,7.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК

1. Сверхбыстрый высоковольтный тиристорный коммутатор / А.И. Гусев, С.К. Любутин, С.Н. Рукин, С.Н. Цыранов // Известия ВУЗов. Физика. – 2014. – Т. 57, № 12/2. – С. 152 – 157.
2. 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.
3. 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.
4. Superfast thyristor-based switches operating in impact-ionization wave mode/ A.I. Gusev, S.K. Lyubutin, S.N. Rukin, S.N. Tsyranov // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2016. – Vol. 44, № 10. – Pp. 1888 – 1893.
5. 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.
6. 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.
7. Joint effect of temperature and voltage rise rate on the switching process of Si thyristors triggered in impact-ionization wave mode/ A.I. Gusev, S.K. Lyubutin, S.N. Rukin, B.G. Slovikovsky, S.N. Tsyranov, O. Y. Perminova // Semiconductor science and technology. – 2018. –Vol. 33. – P. 115012.
8. 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.

### Материалы конференций

1. High power thyristors triggering providing a subnanosecond closing time / A.I. Gusev, S.K. Lyubutin, S.N. Rukin, S.N. Tsyranov // 2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). – 2014. – Pp. 31 – 34.
2. Thyristor based switches triggered in impact-ionization wave mode / A.I. Gusev, S.K. Lyubutin, S.N. Rukin, B.G. Slovikovsky, S.N. Tsyranov // 2016 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). – 2016. – Pp. 488 – 493.
3. Investigation of thyristor-based switches triggered in impact-ionization wave mode / A.I. Gusev, S.K. Lyubutin, S.N. Rukin, B.G. Slovikovsky, S.N. Tsyranov // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 830, №. 1. – P. 012016.

4. High current and current rise rate thyristor based switches / A. Gusev, S. Lyubutin, A. Ponomarev, S. Rukin, B. Slovikovsky, S. Tsyranov // 2017 IEEE International Conference on Pulsed Power (PPC). – 2017. – Pp. 1 – 5.