

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт электрофизики
Уральского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



Гусев Антон Игоревич

**ТИРИСТОРНЫЕ КОММУТАТОРЫ С УДАРНО-ИОНИЗАЦИОННЫМ
МЕХАНИЗМОМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ**

Специальность 01.04.13 – электрофизика, электрофизические установки

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н.

Рукин С.Н.

Екатеринбург – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ КОММУТАТОРЫ С УДАРНО-ИОНИЗАЦИОННЫМ МЕХАНИЗМОМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ).....	12
1.1 Переключение полупроводниковых приборов волной ударной ионизации.....	12
1.2 Инициирование и распространение ударно-ионизационного фронта	15
1.3 Ударно-ионизационные коммутаторы.....	26
1.4 Выводы по первой главе.....	28
ГЛАВА 2 СТАДИЯ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В ПРОВОДЯЩЕЕ СОСТОЯНИЕ.....	31
2.1 Схема эксперимента, исследуемые тиристоры, средства и методика измерения.....	31
2.2 Влияние скорости нарастания напряжения.....	34
2.3 Совместное влияние скорости нарастания напряжения и температуры структуры.....	43
2.4 Выводы по второй главе.....	47
ГЛАВА 3 СТАДИЯ ПРОТЕКАНИЯ ТОКА.....	49
3.1 Переключение тока со скоростью нарастания выше 100 кА/мкс.....	49
3.2 Коммутация емкостных накопителей с запасаемой энергией 12 кДж и разрядным током 200 кА.....	57
3.3 Влияние dU/dt на процесс коммутации и стадию протекания тока	71
3.4 Выводы по третьей главе.....	75
ГЛАВА 4 ЧАСТОТНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ.....	78
4.1 Схема экспериментальной установки и методика измерений.....	81
4.2 Тиристорные коммутаторы с рабочим напряжением 2 и 4 кВ.....	85

4.3 SOS-генератор с 12-кВ первичным тиристорным коммутатором, запускаемым волной ударной ионизации.....	90
4.4 Выводы по четвертой главе	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	97
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	100

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

В настоящее время мощная импульсная техника [1] широко используется, как в фундаментальных, так и в прикладных научных исследованиях, а также имеет множество технологических применений в промышленности [2]. Эти 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 является на сегодняшний день актуальной задачей.

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 [3]. 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. Новые принципы коммутации мощных импульсов тока полупроводниковыми приборами в микро-, нано- и субнаносекундном диапазонах представлены в [4]. Там же описан механизм формирования задержанной ударно-ионизационной волны в полупроводниках, который экспериментально был обнаружен в 1979 году [5]. 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) [6], [7], [8]. 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 >1 кВ/нс. На этом же принципе работают высоковольтные твердотельные коммутаторы, которые получили название ДГУ (динисторы с глубокими уровнями) [9], [10], [11]. Рабочее напряжение FID и ДГУ лежит в диапазоне 1-10 кВ при коммутируемой мощности в десятки МВт, а максимальная скорость нарастания тока может достигать 200 кА/мкс [12], [13].

Описанные выше динисторы, являясь уникальными приборами, пока еще не доступны широкому кругу экспериментаторов и разработчиков мощных импульсных устройств. С другой стороны, еще в работе [4] 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.

В работе [14] нами была показана возможность запуска серийных низкочастотных тиристоров таблеточной конструкции в режиме ударно-ионизационной волны. В экспериментах использовались кремниевые тиристоры с критической скоростью нарастания тока 400 А/мкс при их запуске традиционным способом с помощью подачи импульса тока на управляющий электрод. В наших экспериментах к основным электродам тиристора прикладывался наносекундный импульс напряжения, который инициировал ударно-ионизационную волну в структуре, вследствие чего тиристор переходил в проводящее состояние за время около 200 пс. При этом скорость нарастания тока через тиристорный ключ из 6-ти последовательных тиристоров при разряде емкостного накопителя на резистивную нагрузку достигала 110 кА/мкс, а коммутируемая мощность – 190 МВт.

Очевидно, что проведение дальнейших исследований процесса переключения серийных тиристоров в режиме ударно-ионизационной волны 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 пропуском 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 $\sim 4,5$ до $\sim 7,0$ 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 ~ 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 тиристорov 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 ~ 8 кА, скоростью нарастания ~ 17 кА/мкс и длительностью импульса $\sim 1,5$ мкс.

Практическая значимость

Проведенные исследования показали, что тиристорные коммутаторы на основе промышленных низкочастотных тиристоров 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 тиристоров работать при зарядном напряжении до 20 кВ, выдерживать без разрушения протекание тока амплитудой до 200 кА и скорость 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 сильноточных 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).

Кроме этого, применение ударно-ионизационных тиристорных коммутаторов в первичных накопителях энергии мощных SOS-генераторов позволяет сократить число ступеней предварительной магнитной компрессии энергии, что значительно повышает эффективность генераторов и существенно снижает их массу и габариты. В конечном счете, 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 ~ 500 до ~ 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 ~ 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

Полученные в рамках диссертационной работы результаты были представлены на международных симпозиумах и конференциях: 18-й и 19-й международный симпозиум по сильноточной электронике (ISHCE-2014, 2016); международная конференция IEEE по импульсным модуляторам и высоковольтной технике (IPMHVC-2014, 2016); 21-я международная конференция IEEE по мощной импульсной технике (PPC-2017).

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 12 печатных 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 тиристорov при возбуждении в них ударно-ионизационной волны. В работе были использованы современные методики 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 «Times Microwave» (полоса пропускания 26 ГГц), широкополосные высоковольтные аттенюаторы марки «Barth Electronics» (полоса пропускания до 18 ГГц) и цифровые осциллографы реального времени марки «Tektronix» с полосой пропускания до 4 ГГц.

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.

ГЛАВА 1

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ КОММУТАТОРЫ С УДАРНО-ИОНИЗАЦИОННЫМ МЕХАНИЗМОМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ (ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ)

1.1 Переключение полупроводниковых приборов волной ударной ионизации

Мощные полупроводниковые коммутаторы, используемые в импульсной технике, имеют несколько различных механизмов включения. Наиболее распространённым и хорошо изученным является инжекционный механизм, его описание можно найти, например в [15]. При инжекционном механизме включения переход полупроводникового коммутатора в проводящее состояние обусловлен движением подвижных носителей заряда – электронов и дырок, которые при своем движении заполняют низколегированные базовые области приборов хорошо проводящей электронно-дырочной плазмой. Однако, инжекционные коммутаторы сравнительно медленные. В работах [4], [6], [16] приводятся оценки максимального быстродействия силовых кремниевых приборов с инжекционным механизмом включения. Насыщенная скорость носителей зарядов в кремнии равна $V_s \approx 10^7$ см/с при напряженности поля $E_s \approx 10^4$ В/см вследствие рассеяния на оптических фононах. При характерной длине базовой области в несколько сотен микрометров для высоковольтных приборов, время коммутации за счёт инжекции носителей зарядов принципиально не может быть меньше нескольких наносекунд.

Генерация электронно-дырочных пар в базовой области мощным импульсом лазерного излучения позволяет осуществлять быструю (субнаносекундную) коммутацию сравнительно больших мощностей. Примеры таких коммутаторов и их принцип действия описаны в [17], [18], [19], [20]. Современные твердотельные источники импульсного лазерного излучения могут иметь малые габариты (50-500 см³ вместе с драйвером и источником питания) при импульсной оптической мощности, достаточной для коммутации нелинейных

ключей из GaAs (100-1000 Вт). Использование подобной техники позволило еще в конце прошлого века достигнуть гигаваттного уровня коммутируемой электрической мощности, а для единичных ключей - 60 мВт [21]

Ещё одно решение проблемы быстрой коммутации больших мощностей было найдено, когда в 1979 г. в Физико-техническом институте им. Иоффе И.В. Греховым с коллегами был открыт эффект формирования быстрого ударно-ионизационного фронта в обратном смещённом кремниевом $p-n$ -диоде под воздействием быстронарастающего (~ 1 кВ/нс) импульса перенапряжения [5]. Позже в 1985 г. результаты были подтверждены независимыми исследованиями, проведёнными в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса, США [22]. Согласно работе [3], формирование ударно-ионизационного фронта является одним из самых быстрых неоптических процессов генерации плазмы в полупроводниках, при этом время переключения высоковольтного прибора составляет около 100 пикосекунд. Другим возможным механизмом получения пикосекундной коммутации является сверхбыстрое переключение в GaAs структурах [23]. Данное переключение не связано с прохождением волн ударной ионизации.

Исторически первым полупроводниковым коммутатором, который работал за счёт возбуждения ударно-ионизационного фронта, был кремниевый диод [24]. Он представлял собой полупроводниковую $p^+-p-n-n^+$ -структуру, изготовленную по диффузионной технологии. Экспериментально было обнаружено [12], что при воздействии импульса перенапряжения со скоростью нарастания ~ 1 кВ/нс на такую структуру, происходит её быстрое переключение в проводящее состояние за время 100-200 пс. При изменении температуры диода, характер переключения оставался практически одинаковым в диапазоне от температуры жидкого азота до 80 °С. Эффект переключения исчезал при температуре выше 90 °С, а также при освещении структуры, создающим фототок более 1 мкА; в этих случаях диод работал в обычном режиме лавинного пробоя, когда форма тока повторяла форму импульса перенапряжения. Временной разброс момента переключения относительно формы импульса перенапряжения составлял менее 30 пс.

В работе [24] впервые приводится физическая модель переключения диодной структуры при возбуждении в ней ударно-ионизационного фронта. Согласно этой модели в начальный момент времени к диоду приложено обратное напряжение, при этом в n -базе образуется две области: область объёмного заряда ООЗ шириной $W_{ООЗ}$, в которой носители заряда отсутствуют, и нейтральная часть базы W_n с плотностью свободных электронов порядка 10^{14} см^{-3} . Максимальная напряжённость электрического поля E_0 в этот момент близка к напряжённости поля статического пробоя. Когда к структуре прикладывается быстронарастающий импульс перенапряжения, через область $W_{ООЗ}$ протекает ток смещения, а через область W_n – ток проводимости. В виду малой длительности воздействующего импульса перенапряжения, в результате тепловой генерации не успевают образоваться достаточное количество носителей заряда в области $W_{ООЗ}$. Таким образом, процесс лавинного пробоя не может начаться немедленно. Примерно через 2 нс вблизи p – n -перехода образуется область Δ , в которой электрическое поле превышает порог ударной ионизации $E_b = 2 \cdot 10^5 \text{ В/см}$. В это же время в нейтральной части базы W_n электрическое поле становится достаточным для слабой ударной ионизации за счёт основных носителей заряда – электронов. Дырки, образующиеся в нейтральной области W_n , движутся в направлении области Δ с насыщенной дрейфовой скоростью V_s , и инициируют в ней интенсивный процесс лавинной ионизации, в результате которого область Δ заполняется плотной электронно-дырочной плазмой. Электрическое поле резко снижается в области заполненной плазмой, и одновременно увеличивается в приграничных областях, тем самым запуская процесс ударной ионизации в них. Таким образом, происходит формирование ударно-ионизационного фронта. Это увеличивает поток дырок, и нейтральная часть базы заполняется электронно-дырочной плазмой. Скорость движения фронта V_f зависит от электрического поля на границе фронта и может в несколько раз превышать насыщенную дрейфовую скорость V_s . Время задержки переключения определяется временем, необходимым для перемещения дырок из нейтральной части базы W_n в область сильного поля Δ с насыщенной дрейфовой скоростью V_s . Поэтому время задержки

срабатывания от импульса к импульсу остаётся неизменным, что обеспечивает малый временной разброс при работе коммутатора. На основе данной модели были разработаны субнаносекундные обострители импульсов и коммутаторы [12], которые использовались в различных импульсных генераторах. В дальнейшем данная модель была значительно доработана и уточнена.

1.2 Инициирование и распространение ударно-ионизационного фронта

Численное моделирование показало [12] [25], что концентрация начальных носителей 10^9 см^{-3} , необходимая для запуска ионизационного фронта, может быть достигнута при скорости нарастания импульса перенапряжения более 2 кВ/нс и начальном смещении менее 400 В. Так как на практике обостряющие диоды хорошо работают при скорости нарастания ~ 1 кВ/нс и высоком обратном напряжении, стало понятно, что должен существовать другой источник начальных носителей, каким-либо образом синхронизированный с запускающим импульсом напряжения. Было сделано предположение, что таким источником могут стать глубокие примеси в полупроводнике с достаточно большой энергией активации [26]. Обычно глубокие примеси (такие как Au, Pt и т.д.) являются эффективными центрами рекомбинации в нейтральной части *n*-базы и центрами термогенерации носителей в ООЗ. Поэтому, при моделировании эффект переключения пропадал даже при низких концентрациях ($\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$) этих примесей.

Однако оказалось что технология производства полупроводников, широко применяемая в России, приводит к появлению весьма необычных дефектов в *n*-базе [27], [28]. Одним из ключевых этапов этой технологии является формирование глубоко залегающего *p-n*-перехода путём диффузии алюминия из его оксида. Это вероятно наиболее простой и эффективный способ, который, тем не менее, сопровождается образованием дефектов в кремнии. Эти дефекты представляют собой донорные центры атомов серы с шестью электронами на внешнем энергетическом уровне, то есть два из них потенциально могут стать свободными носителями заряда в кристаллической решётке кремния. Энергия

ионизации при переходе от базового состояние к иону с одним электроном равна 0,28 эВ, энергия перехода в полностью ионизованное состояние – 0,54 эВ. Данные переходы соответствуют энергетическим уровням M и U в запрещённой зоне кремния, которые имеют энергию ионизации, превышающую тепловую энергию при комнатной температуре (0,1-0,2 эВ) и являются глубокими уровнями.

Теория полевой ионизации глубоких уровней в полупроводниках была разработана в середине 1980-х [29]. На основе этой теории в работе [26] исследовано происхождение начальных носителей заряда, которые инициируют ударно-ионизационный фронт в высоковольтном $p-n$ -переходе, обеспечивая сверхбыстрое переключение p^+-n-n^+ диодной структуры. Рассматривался диапазон напряжённости электрического поля от $2 \cdot 10^5$ до $5 \cdot 10^5$ В/см, так как именно при этих значениях происходит процесс переключения. Согласно теории существует два механизма ионизации глубоких уровней в данном диапазоне напряжённости поля: первое это туннелирование с участием фононов при высоких температурах и низкой напряжённости поля; второе – прямое туннелирование при высоких полях и низкой температуре.

При типичном импульсе перенапряжения со скоростью нарастания ~ 1 кВ/нс напряжённость электрического поля увеличивается с $2 \cdot 10^5$ В/см (напряжённость статического пробоя) до $3-4 \cdot 10^5$ В/см за время около 1 нс. Простая оценка показывает [26], что полученная скорость генерации электронов с уровнями U и M при концентрации глубоких примесей $N_{PI} = 10^{13}$ см⁻³ способна создать концентрацию электронов более чем 10^9 см⁻³ в течение 1 нс. Такой концентрации достаточно для равномерного запуска ударно-ионизационного фронта в структуре. Этот фронт движется в среде, которая становится источником электронов, после того как напряжённость поля в ней превышает определённый пороговый уровень $\sim 3 \cdot 10^5$ В/см. В этом случае ширина n -базы диода может быть значительно сокращена, так как нет необходимости в нейтральной части n -базы. За счёт этого снижается остаточное напряжение на диоде после его переключения в проводящее состояние.

Численные расчеты, выполненные в работе [30], показали, что имеется принципиальная возможность возбуждения ещё более быстрых ионизационных фронтов. Если к $p^+ - n - n^+$ -диоду без глубоких ловушек в n -базе приложить импульс перенапряжения со скоростью нарастания более 10 кВ/нс, то через доли наносекунды напряжённость поля в максимуме достигает $\sim 10^6$ В/см и происходит туннельная ионизация кремния. Появляющиеся свободные электроны оказываются в сверхвысоком поле и инициируют формирование ударно-ионизационного фронта, скорость движения которого в таких полях примерно в 50 раз больше насыщенной и всего на полтора порядка меньше скорости света. В этих условиях напряжение на $p - n$ -переходе достигает 8 кВ и затем примерно за 20 пс падает до 10 В [3]. Позже в работах [31], [32], [33] туннельный механизм возбуждения ударно-ионизационного фронта в кремниевых диодных структурах был реализован экспериментально и исследован численными методами.

Оба типа фронтов ионизации, описанные выше, обычно возбуждаются в $p^+ - n - n^+$ -диодах, когда протяжённость области, в которой поле превышает пороговое значение, значительно меньше ширины n -базы. Расчёты, проведённые в работе [34], показывают, что совершенно новый тип ионизационного фронта может возбуждаться в структуре, если напряжённость поля превышает пороговое значение во всей n -базе, а концентрация начальных носителей заряда плавно уменьшается в направлении распространения фронта. Численное моделирование такого процесса [35] показало, что высокая скорость движения фронта достигается при меньшей напряжённости электрического поля по сравнению с туннельным механизмом. Оптимизация полупроводниковой структуры и параметров импульса запуска потенциально может обеспечить время переключения порядка ~ 10 пс.

Ударно-ионизационные фронты могут использоваться для сверхбыстрой коммутации диодов, а также более сложных полупроводниковых структур – транзисторов и динисторов [4]. Динисторные коммутаторы на основе ударно-ионизационного фронта имели различные названия в литературе в ходе развития представлений о механизме их переключения. Изначально данные динисторы

относились к приборам на основе принципа коммутации с помощью задержанной ударно-ионизационной волны [4]. В англоязычной литературе [7], [8] такие динисторы получили название Fast Ionization Dynistors (FID). Позже, когда возникновение носителей зарядов, инициирующего ударно-ионизационный фронт, связали с наличием в полупроводнике технологических примесей с глубокими уровнями ионизации [26], приборы, работающие на этом принципе, стали обозначать [36] как динисторы с глубокими уровнями (д.г.у.) или в англоязычном варианте – Deep Level Dynistors (DLD) [10]. Однако в последние годы авторы этих работ отказались от этого термина и вернулись к следующим обозначениям: динисторы с быстрой ионизацией (д.б.и.) в русскоязычной литературе [37] и FID в англоязычной [38]. Причиной изменения терминологии, вероятно, является уточнение физической модели возникновения начальных носителей заряда в области сильного поля. Это обсуждалось выше при рассмотрении диодных обострителей. Следует отметить, что динисторные коммутаторы на основе ударно-ионизационного фронта являются уникальными полупроводниковыми приборами, так как после субнаносекундного переключения, они способны оставаться во включенном состоянии также как и обычные тиристоры, благодаря инжекции электронов и дырок из сильнолегированных эмиттерных p^+ - и n^+ -слоев.

Рассмотрим процесс формирования ударно-ионизационного фронта в динисторной структуре под воздействием быстронарастающего импульса перенапряжения на примере FID [11], и DLD [12]. Согласно [3] в субнаносекундном переключателе ударно-ионизационный фронт возбуждается в коллекторном p - n -переходе динисторной n^+p - n - p^+ -структуры. В исходном состоянии этот переход смещён в запиорном направлении и блокирует напряжение внешней цепи; при этом около него формируется обеднённая свободными электронами область объёмного заряда W_{003} , максимальная напряженность поля E_s в которой меньше критической величины для стационарного лавинного пробоя $E_b \approx 2 \cdot 10^5$ В/см. Начальные условия одинаковы для FID и DLD.

Для переключения приборов к ним прикладывается импульс перенапряжения, нарастающий со скоростью не менее киловольт в наносекунду. В этом

случае уже через одну наносекунду напряжённость поля на *p-n*-переходе становится выше критической, но пробой не происходит из-за отсутствия там свободных носителей, способных вызвать ударную ионизацию кремния. Дело в том, что за столь короткое время тепловая генерация не успевает создать заметное количество свободных носителей.

В работе [11] говорится, что одним из возможных механизмов возникновения свободных носителей в области сильного поля в момент переключения FID может быть ударная ионизация в нейтральной части *n*-базы, обусловленная основными носителями заряда – электронами. Возникающие в результате этого дырки дрейфуют в сторону области сильного поля и инициируют ударную ионизацию в нём. Подобная модель впервые была применена в работе [24] для описания процесса переключения диодного обострителя импульсов.

В DLD реализуется иной механизм появления начальных носителей заряда в области сильного поля, который описан в [3]. В *n*-базу DLD введены электронные ловушки – примеси либо дефекты структуры – с энергией ионизации, примерно равной половине ширины запрещённой зоны кремния; во всём диапазоне рабочих температур ловушки частично заполнены электронами. При росте поля до $3 \cdot 10^5$ В/см происходит термополевая ионизация ловушек, освобождающиеся электроны оказываются в области сильного поля и вызывают быструю ударную ионизацию.

Характерное время ионизации атомов кремния составляет менее 10^{-11} с. Примерно за это же время приколлекторная область заполняется электронно-дырочной плазмой, поле в ней падает, но возрастает в соседних областях, где начинается ионизация ловушек, и т.д. Сформировавшийся таким образом ионизационный фронт проходит через *n*-область, заполняя её электронно-дырочной плазмой. Скорость движения фронта V_f определяется в основном напряжённостью поля в максимуме и обычно в 3-5 раз превышает предельно возможную (насыщенную) скорость движения электронов в кремнии. Переключение высоковольтного прибора происходит за 100-200 пс, после чего происходит дальнейший рост концентрации плазмы обычным путём за счёт

инжекции носителей из n^+ - и p^+ -слоёв. За время нескольких сотен пикосекунд концентрация достигает значения $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Таким образом, основным отличием FID от DLD является предполагаемый механизм образования носителей заряда в области сильного поля в момент переключения. В работе [10] сообщается, что при таком механизме образования фронта в DLD отпадает необходимость в создании протяжённой нейтральной области в n -базе диодистора. Поэтому в разработанных диодисторах с глубокими уровнями толщина базы значительно уменьшается, а распределение поля в ней при блокировании статического напряжения становится более однородным. Большая величина начальной напряжённости поля по всей базе приводит к ускорению движения фронта и увеличению концентрации плазмы за ним, т.е. к снижению остаточного напряжения.

В работе [11] приводятся экспериментальные данные по сравнению остаточного напряжения для FID и DLD. В эксперименте были использованы диодисторы с диаметром кремниевой пластины 12 мм и рабочим напряжением 2,3 кВ. Остаточное напряжение на DLD после коммутации в три раза меньше, чем на FID, а спад напряжения до стационарного значения происходит гораздо быстрее. Это существенное преимущество DLD, так как оно снижает потери и позволяет использовать диодисторы в коммутаторах, работающих с большими импульсными токами и высокой частотой следования импульсов.

Согласно [12] перспективным направлением развития мощных твердотельных коммутаторов является использование широкозонных полупроводниковых материалов. Два из них – арсенид галлия (GaAs) и карбид кремния (SiC) в настоящее время доступны на рынке. Основные параметры некоторых полупроводниковых материалов, в которых исследовалось возбуждение ударно-ионизационного фронта, приведены в таблице 1.1 [12].

Возможность возбуждения ударно-ионизационного фронта в GaAs впервые была показана в 1987 г. в исследованиях диодных обострителей [39]. Было обнаружено, что сверхбыстрая (~ 70 пс) коммутация тока арсенидгалиевыми диодами возникает при подаче на них импульса перенапряжения со скоростью

нарастания $\sim 6 \cdot 10^{12}$ В/с. При этом амплитуда напряжения на диоде перед моментом переключения в три раза превышает амплитуду стационарного пробоя. Плотная электронно-дырочная плазма, образованная ударно-ионизационным фронтом, является интенсивным источником инфракрасного излучения.

Таблица 1.1 – Основные параметры полупроводниковых материалов [12]

Материал	Si	GaAs	4H-SiC
Ширина запрещённой зоны, эВ	1,12	1,42	3,2
Насыщенная дрейфовая скорость носителей заряда, см/с	$1 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7$
Подвижность электронов, $\text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	1400	8500	800
Напряженность электрического поля лавинного пробоя, В/см	$2 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^6$
Теплопроводность, Вт/см·К	1,3	0,5	4,9

Процесс возбуждения ударно-ионизационного фронта в GaAs был исследован с помощью электронно-оптической камеры со скоростной развёрткой в работе [40]. Для этого был создан генератор, формирующий импульсы напряжения с амплитудой 2-10 кВ с фронтом 100 пс и длительностью 1-3 нс. К арсенидгаллиевому диоду прикладывался быстронарастающий импульс напряжения. Диод был помещён в коаксиальную линию с волновым сопротивлением 50 Ом, при этом измерялось напряжение на диоде. Инфракрасное излучение из боковых граней образца через фокусирующую систему попадало на фотокатод электронно-оптического преобразователя «Агат СФ».

Хронограммы показали довольно высокую однородность излучения по площади образца и во времени. Излучение со всех других граней имело примерно одинаковый характер. По мнению авторов [40], полученные данные убедительно свидетельствуют о том, что волновой пробой GaAs диодов в исследуемых условиях происходит довольно однородно, то есть без образования стримеров в полупроводниковой структуре.

В работе [40] при объяснении сверхбыстрого переключения предполагалось, что эффект носит объемный характер и происходит по всей площади прибора. Соображения, на которых основывался такой подход, носили косвенный характер. В работе [41] с помощью электронно-оптического преобразователя впервые произведено непосредственное визуальное наблюдение процесса сверхбыстрого переключения. Наблюдения показали, что пробой носит микроплазменный характер. Первая микроплазма диаметром 30-50 мкм возникает на фаске структуры. В этой работе исследовались GaAs p - n -структуры: толщина n_0 -базы 40-50 мкм, p^+ -эмиттера ~ 15 мкм. Характерное значение концентрации доноров в базе $5\text{-}8\cdot 10^{14}$ см $^{-3}$, акцепторов в эмиттере $10^{17}\text{-}10^{18}$ см $^{-3}$. При измерениях на постоянном токе характерное значение напряжения лавинного пробоя составляло 350-400 В. Для проведения экспериментов образец помещался в разрыв 50-омной микрополосковой линии. На диод подавались высоковольтные импульсы обратной полярности с длительностью фронта ~ 200 пс и различной амплитудой U_0 , которые формировались с использованием высоковольтного ртутного реле. При этом измерялся ток, протекающий через диод, временное разрешение схемы составляло 100-130 пс. В этих условиях время переключения диода в проводящее состояние находилось в субнаносекундном диапазоне. При больших значениях U_0 длительность фронта соответствовала временному разрешению схемы и не превышала 100 пс. Также увеличение U_0 приводило к уменьшению разброса в величине задержки. Временная стабильность переключения была не хуже 30-50 пс. Таким образом, в работе [41] воспроизведены результаты, которые давали ранее основание трактовать сверхбыстрое переключение, как объемное и однородное по площади.

В работе [41] на фотографиях светящихся участков на поверхности фаски, зафиксированных с помощью электронно-оптического преобразователя, было видно, что переключение происходит по отдельным токопроводящим каналам, причем с ростом U_0 число таких каналов возрастает. Светящиеся пятна, отождествляемые с каналами переключения, имели диаметр 30-50 мкм. Их форма устанавливалась за время полной длительности импульса порядка нескольких

наносекунд. Для некоторых каналов было проделано наблюдение за процессом переключения с временным разрешением ≤ 500 пс. Установлено, что свечение на фронте нарастания тока возникает вначале в узком канале диаметром ≤ 10 мкм, и лишь затем свечение захватывает область диаметром 30-50 мкм.

Качественное представление механизма такого переключения приведено в работе [41]. Оно заключается в следующем. Концентрация подвижных носителей в базе растёт за счёт процессов лавинного размножения. Предполагается, что после того как эта концентрация сравнивается с концентрацией донорной примеси в базе в какой-либо точке прибора, в ней формируется проводящий канал, который начинает распространяться от $p-n$ -перехода к p^+ -слою (подобно стримеру). В течение времени распространения шнура напряжение на структуре остаётся высоким и условие переключения может выполняться ещё в нескольких точках. Также авторы отмечают, что аналогичная картина субнаносекундного переключения в принципе может реализовываться и в объеме полупроводниковой $p-n$ -структуры, если краевой контур диода достаточно надежно защищен от поверхностного пробоя.

В работе [42] авторы на основании предыдущих исследований признают возможность как однородного, так и филаментарного характера включения полупроводниковых структур при возбуждении в них ударно-ионизационного фронта. Таким образом, на сегодняшний день нет однозначной точки зрения относительно характера пробоя в полупроводнике за счёт ударно-ионизационной волны. Есть свидетельства как однородного [40], так и филаментарного [41] включения полупроводниковой структуры. Данный вопрос требует дальнейшего изучения.

Позже в работах Вайнштейна С.Н. [23], а далее и других исследователей [43], [44], было показано, что наиболее вероятным механизмом переключения арсенид-галлиевых коммутаторов является механизм коллапсирующих доменов электрического поля, а не распространение ударно-ионизационного фронта.

В настоящее время продолжают работы по исследованию пикосекундной коммутации в GaAs диодах, так как они обладают рядом преимуществ по

сравнению с Si диодами. Например, GaAs диоды имеют преимущества в схемах с низкоомной нагрузкой, так как имеют существенно меньшее остаточное сопротивление по сравнению с кремниевыми диодами. Кроме того, эффект Lock-On (защёлкивание) позволяет использовать GaAs диоды для генерации длинных импульсов напряжения с пикосекундными фронтами. Это подтверждено в недавней работе [42], где экспериментально сравнивались высоковольтные Si и GaAs диоды с ударно-ионизационным механизмом переключения, обеспечивающие пикосекундное время коммутации. В работе использовалась экспериментальная установка, которая позволяла с достаточной точностью измерять ток и напряжение на диодах во время коммутации, причём как вместе, так и по отдельности. Это позволило измерить амплитуду остаточного напряжения на диодах после переключения. Исследовались кремниевые и арсенидгаллиевые диодные структуры идентичные по геометрии и напряжению статического пробоя на уровне ~ 1 кВ. Все исследуемые приборы переключались при напряжении близком к 2 кВ и формировали импульс напряжения амплитудой 1 кВ и временем нарастания 100 пс. Несмотря на широкую запрещённую зону, GaAs диоды не показали ни бóльшую амплитуду, ни меньшее время при переключении по сравнению с Si диодами. Амплитуда остаточного напряжения для Si диодов составляла 100-200 В, для GaAs она была на порядок меньше, около нескольких десятков В. Главным отличием GaAs диодов является так называемый эффект Lock-On, когда диод остаётся в проводящем состоянии на протяжении всего времени, пока к нему приложен импульс напряжения. В этом случае не происходит восстановления $p-n$ -перехода как в Si диоде. Подобный эффект наблюдается в оптически активируемых GaAs ключах [18]. Это позволяет использовать GaAs диоды для формирования достаточно длинных импульсов с крутым передним фронтом порядка ~ 100 пс.

Полупроводниковые приборы на основе карбида кремния SiC в последние десятилетия успешно развиваются и в скором времени смогут вытеснить Si приборы в области преобразовательной техники [45]. Похожая тенденция наблюдается и в области мощной импульсной техники. Согласно [12] SiC

является перспективным материалом для изготовления мощных полупроводниковых коммутаторов с ударно-ионизационным механизмом переключения. У карбида кремния напряженность поля лавинного пробоя в десять раз выше, а насыщенная дрейфовая скорость носителей в два раза больше, чем у кремния (таблица 1.1). Это означает, что прибор на основе карбида кремния будет в двадцать раз быстрее, чем кремниевый коммутатор, при одном и том же уровне рабочего напряжения. Помимо этого, более высокая концентрация примеси и почти в четыре раза большая теплопроводность дают возможность SiC приборам работать при высоких плотностях тока.

Теоретические исследования мощных коммутаторов пикосекундного диапазона на основе распространения ударно-ионизационного фронта в карбид-кремниевых структурах [46], [47] показали, что ожидаемая скорость фронта в 20 раз превышает скорость фронта в кремниевых структурах, при этом концентрация плазмы на два порядка выше. Технологические примеси и дефекты в SiC могут быть источниками начальных носителей зарядов при возбуждении ударно-ионизационного фронта. Однако, этот процесс требует запускающего импульса со скоростью нарастания более $\sim 10^{13}$ В/с.

Технология производства монокристаллического карбида кремния достаточно сложная и не отработанная, поэтому в настоящее время качество SiC пленок и подложек хуже, чем кремниевых. Возможность возбуждения ударно-ионизационного фронта в SiC остаётся под вопросом. В работе [12] сообщается об экспериментах, проводимых в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, целью которых было исследование данного механизма переключения в SiC диодах. Исследуемые диоды были изготовлены в компании Cree Inc. (США). Была разработана специальная конструкция краевого контура, предотвращающая поверхностный пробой структуры. Исследования ударно-ионизационного пробоя в диоде показали, что пробой развивается в виде микроплазм, которые локализуются в областях, где существуют дислокации. Эти дефекты проникают из подложки в плёнку. Когда короткий (~ 1 нс) запускающий импульс со скоростью нарастания $\sim 10^{13}$ В/с прикладывается к прибору, происходит его разрушение в точке, где

образуется первая микроплазма, ещё до того как формируется ударно-ионизационный фронт. Это значит, что качество лучших SiC пленок на момент проведения эксперимента в 2005 году было недостаточно высоким для субнаносекундных коммутационных технологий. Позже в компании Cree Inc. были разработаны плёнки с меньшей концентрацией дислокаций, но, к сожалению, на сегодняшний день эффект возбуждения ударно-ионизационного фронта в SiC не был подтверждён экспериментально [42].

1.3 Ударно-ионизационные коммутаторы

Наиболее распространенные на практике ударно-ионизационные коммутаторы можно условно разделить по типу полупроводниковой структуры на диодные и динисторные. Диодные ударно-ионизационные коммутаторы обычно используются в качестве обострителей импульсов напряжения наносекундной длительности. Динисторные ударно-ионизационные коммутаторы имеют более широкую область применения, так как они позволяют коммутировать большие по длительности импульсы по сравнению с диодными коммутаторами. Ниже приведены параметры некоторых диодных и динисторных ударно-ионизационных коммутаторов.

Среди диодных ударно-ионизационных коммутаторов особый интерес представляют коммутаторы с туннельным механизмом возбуждения ударно-ионизационного фронта, поскольку они, согласно численным расчётам [30], могут обеспечивать время коммутации порядка ~ 30 пс. Экспериментально возможность сверхбыстрого переключения тока на основе туннельно-ударного ионизационного фронта полупроводниковым кремниевым коммутатором была подтверждена в работе [31]. На полупроводниковый прибор, содержащий 20 последовательно соединенных кремниевых диодных структур, подавался импульс напряжения амплитудой ~ 200 кВ с временем нарастания 1 нс. После переключения прибора в передающей 50-омной линии были получены импульсы с амплитудой 150-160 кВ, импульсной мощностью 500 МВт, длительностью 1.4 нс и временем нарастания 200-250 пс. Максимальные скорости роста тока и напряжения составили 10 кА/нс и 500 кВ/нс соответственно. Плотность коммутируемого тока – 13 кА/см². В

работе также были приведены результаты численного моделирования, показывающие, что инициирующим фактором процесса коммутации тока является достижение электрическим полем величины $\sim 10^6$ В/см в окрестности p - n -перехода, что свидетельствует о туннельной ионизации кремния. Экспериментальные и теоретические исследования данного вопроса были продолжены и в более поздних работах [32], [33]. В них было показано, что электрическое поле вблизи p - n -перехода при очень высокой скорости нарастания напряжения достигает порога зинеровского пробоя ($\sim 10^6$ В/см), даже когда структура диода содержит технологические примеси с глубокими уровнями ионизации с концентрацией до 10^{13} см⁻³.

Динисторные ударно-ионизационные коммутаторы в настоящее время используются в различных импульсных генераторах. В работе [10] экспериментально показана возможность кремниевого DLD (диаметр кристалла 12 мм, максимальное блокируемое напряжение 2,7 кВ) коммутировать импульс тока амплитудой ~ 10 кА, длительностью ~ 400 нс и максимальной скоростью нарастания тока ~ 200 кА/мкс. На основе этих динисторов был разработан коммутатор с рабочим напряжением 8-12 кВ, амплитудой тока 1,2 кА и фронтом нарастания ~ 4 нс. Компактность и высокая максимальная скорость нарастания коммутируемого тока позволили использовать данный коммутатор в системе питания азотного лазера MNL100, разработанного в LTB Lasertechnik (Германия). Было произведено $2 \cdot 10^8$ включений без изменения характеристик коммутатора, что подтверждает высокий ресурс полупроводниковых ударно-ионизационных коммутаторов.

Широкая линейка нано- и субнаносекундных генераторов на основе FID представлена компанией FID Technology, Ltd. Параметры генератора GIN-35: амплитуда напряжения выходного импульса 45 кВ, частота следования импульсов 250 Гц, длительность фронта 120 пс, импульсная мощность 35 МВт. Параметры генератора GIN-10: амплитуда напряжения выходного импульса 10 кВ, частота следования импульсов 100 кГц, длительность фронта 80 пс.

Более мощный DLD ключ имеет следующие параметры: рабочее напряжение 25 кВ, максимальная амплитуда тока 5 кА, время нарастания импульса 150 нс. Этот ключ использовался для запуска коммутатора на основе РВД, обладающего следующими параметрами: рабочее напряжение 25 кВ, максимальная амплитуда тока 200 кА, длительность импульса 500 мкс. Все вышеперечисленные динисторные ударно-ионизационные коммутаторы разработаны в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН [12].

1.4 Выводы по первой главе

На сегодняшний день полупроводниковые структуры с механизмом переключения на основе ударно-ионизационного фронта являются самыми быстрыми неоптическими твердотельными коммутаторами. Они способны блокировать приложенное напряжение амплитудой до нескольких десятков киловольт, коммутировать импульсные токи килоамперного диапазона, при этом время коммутации таких приборов не превышает сотен пикосекунд. Естественно, такие параметры делают ударно-ионизационные коммутаторы крайне востребованными в области мощной импульсной техники.

В настоящее время до конца не ясен механизм ударно-ионизационного переключения полупроводниковых структур. Существует ряд положений, которые требуют дополнительных исследований:

1. Однозначно не определен источник начальных носителей в области сильного поля при формировании ударно-ионизационного фронта.
2. Открыт вопрос о равномерности распределения плазмы по площади прибора в начальный момент времени включения, соответственно не ясен характер включения: однородный или филаментарный.
3. Отсутствуют данные о критической температуре полупроводниковой структуры при разных условиях запуска.

Определение источника начальных носителей позволит проводить численное моделирование коммутационных процессов с большей точностью. В зависимости от параметров запускающего импульса есть три возможных механизма возникновения начальных носителей в области объемного заряда при

формировании ударно-ионизационного фронта в полупроводниковой $p-n$ -структуре. Во-первых, это дрейф носителей с насыщенной скоростью из низколегированной базовой области, этот процесс, вероятно, определяет задержку при включении прибора. Во-вторых, возможна ионизации глубоких уровней (примесей и/или дефектов) непосредственно в области объемного заряда, этот процесс возможен даже при сравнительно низкой напряженности электрического поля ($\sim 10^5$ В/см в кремнии). И наконец, носители могут появляться за счёт туннельной ионизации атомов (зинеровский пробой) при напряженности поля около 10^6 В/см. Стоит отметить, что все три механизма не являются конкурирующими процессами и в принципе могут протекать одновременно, оказывая то или иное влияние на процесс переключения.

Существует проблема определения активной площади, под которой понимается площадь структуры, заполненная плазмой в начальный момент времени коммутации. Нет однозначного ответа на вопрос о равномерности распределения плазмы по площади прибора в начальный момент времени. Есть свидетельства как однородного [40], так и филаментарного [41] характера включения.

Из работы [4] известно, что эффект переключения за счёт ударно-ионизационного фронта в кремниевых структурах исчезает при нагреве до температуры 370 К. Однако в литературе нет данных о влиянии температуры при различных условиях запуска. В частности не понятно 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.

Описанные выше ударно-ионизационные коммутаторы, являясь уникальными приборами, пока еще не доступны широкому кругу экспериментаторов и разработчиков мощных импульсных устройств. С другой стороны, еще в работах [4], [16] 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.

Диссертационная работа имеет как фундаментальный, так и прикладной характер. Цель работы – исследование тиристорных коммутаторов, переключаемых в проводящее состояние волной ударной ионизации.

Фундаментальная составляющая работы позволит лучше понять физику процессов в кремниевых тиристорах с ударно-ионизационным механизмом запуска, для этого требуется решить следующие задачи:

- изучить влияние скорости нарастания напряжения на стадии запуска на процесс переключения;
- определить критическую температуру, при которой эффект переключения исчезает, в широком диапазоне скоростей нарастания напряжения запускающего импульса;
- получить данные по активной площади структуры в зависимости от условий запуска ударно-ионизационного фронта;
- определить предельные рабочие параметры коммутаторов.

В рамках прикладной составляющей диссертационной работы планируется решить следующие задачи:

- показать принципиальную возможность переключения высоковольтных кремниевых тиристоров таблеточной конструкции большой площади в режиме ударно-ионизационного фронта;
- определить рабочие характеристики коммутатора по длительности коммутируемого импульса тока, амплитуде блокируемого напряжения, максимальной амплитуде тока и скорости нарастания тока;
- определить время восстановления тиристоров после формирования в них ударно-ионизационного фронта и протекания силового тока;
- провести частотные и ресурсные испытания тиристорного коммутатора;
- на основании полученных результатов разработать импульсный генератор с использованием тиристорного ударно-ионизационного коммутатора.

ГЛАВА 2

СТАДИЯ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В ПРОВОДЯЩЕЕ СОСТОЯНИЕ

2.1 Схема эксперимента, исследуемые тиристоры, средства и методика измерения

Вторая глава диссертационной работы посвящена исследованиям непосредственно процесса переключения тиристоров из блокирующего в проводящее состояние, то есть без последующего протекания силового тока от внешней схемы. В работе [48] было исследовано влияние скорости нарастания напряжения запускаящего импульса dU/dt на процесс переключения тиристора, а в работах [49], [50] исследовано совместное влияние температуры тиристора и dU/dt . Численное моделирование процессов проведено в работах [48], [51], [52].

При проведении исследований ударно-ионизационного механизма запуска тиристорных структур были использованы промышленные кремниевые тиристоры таблеточной конструкции производства ЗАО «Протон-Электротекс» [53]. Диаметр полупроводникового элемента исследуемых тиристоров составлял 32 и 40 мм, рабочее напряжение было в диапазоне 2,0-2,4 кВ (класс по напряжению 20-24). Средний ток в открытом состоянии – от 320 до 500 А, 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 тиристоров. Тиристоры исследовались как в корпусном, так и в бескорпусном исполнении, внешний вид некоторых тиристоров, исследуемых в работе, приведён на рисунке 2.1. В ходе экспериментов исследовались одиночные тиристоры и их последовательные сборки. Монтаж осуществлялся с использованием рекомендованных производителем радиаторов охлаждения, при этом контролировалось усилие сжатия тиристоров, которое регламентировалось технической документацией и составляло 10-26 кН в зависимости от диаметра структуры.

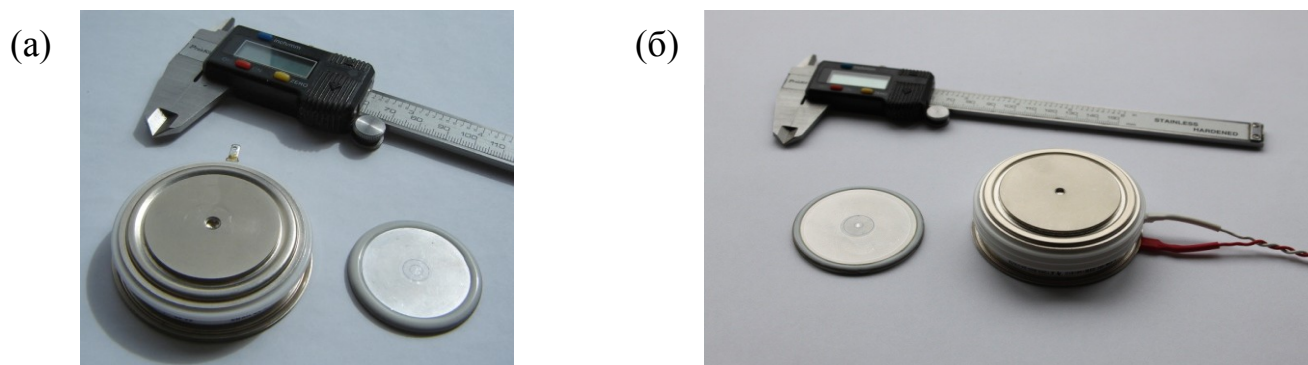


Рисунок 2.1 – Внешний вид тиристора Т343-500-20 (а) с диаметром полупроводникового элемента 40 мм и тиристора Т253-800-24 (б) с диаметром полупроводникового элемента 56 мм

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 SOS генератор SM-200, подробно описанный в работах [54], [55]. Генератор представляет собой настольный портативный прибор с размерами корпуса 60x45x30 см³. Запуск генератора осуществляется от внешнего источника, сигналы управления передаются по оптоволоконной линии.

Схема эксперимента (рисунок 2.2) содержит конденсатор $C1 = 0,1$ мкФ, заряженный до напряжения смещения $U_0 = 2$ кВ отрицательной полярности. Напряжение смещения через резистор $R1 = 100$ кОм подается на исследуемый тиристор Т. Импульс запуска отрицательной полярности подается на тиристор от генератора SM-200 через разделительный конденсатор $C2 = 4,7$ нФ, установленный внутри линии 1, и регистрируется с помощью емкостного датчика 2. Амплитуда импульса на выходе линии при ее работе на согласованную нагрузку 50 Ом составляет ~ 40 кВ, фронт по уровню 0,1-0,9 от амплитуды $\sim 0,9$ нс, длительность импульса на полувысоте $\sim 2,5$ нс, по основанию — около 5 нс. Для изменения скорости нарастания воздействующего на тиристор напряжения служит резистор R2, который выполнен в виде набора резисторов марки ТВО-1. Величина сопротивления R2 в экспериментах изменялась в диапазоне от 0 (резистор замкнут) до ~ 500 Ом.

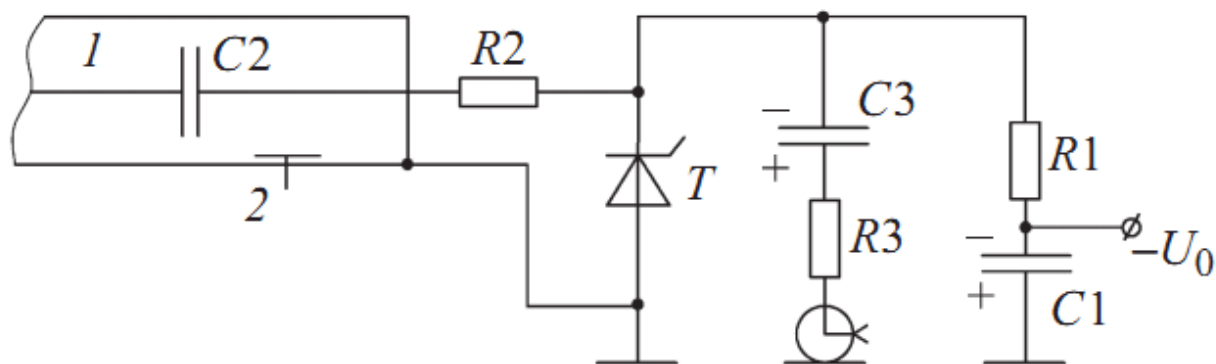


Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки для исследования ударно-ионизационного механизма переключения тиристора без последующего протекания силового тока

В экспериментах исследовались два типа тиристоров таблеточной конструкции производства ЗАО "Протон-Электротекс", имеющие при одинаковом рабочем напряжении полупроводниковую структуру разного диаметра. Кроме этого, для экспериментов были подобраны экземпляры тиристоров с различным удельным сопротивлением исходного *n*-кремния. Первый тиристор марки Т343-500-20 имел следующие паспортные параметры: рабочее напряжение 2 кВ (класс по напряжению – 20), амплитуда ударного тока 8 кА, критическая скорость нарастания тока при включении по управляющему электроду 0,4 кА/мкс, диаметр полупроводникового элемента 40 мм, удельное сопротивление кремния $\rho = 80-85 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Второй тиристор марки Т133-320 с тем же рабочим напряжением имел диаметр полупроводникового элемента 32 мм, параметры по ударному току и критической скорости нарастания тока 6 кА и 0,1 кА/мкс соответственно и был выполнен из кремния с $\rho = 110-120 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Процесс переключения тиристоров в проводящее состояние регистрировался с помощью резистивного делителя напряжения с элементами С3 и R3 (рисунок 2.2). Верхним плечом делителя выступает резистор R3, а нижнее плечо образовано кабелем регистрации с волновым сопротивлением 50 Ом. Конденсатор С3 изолирует делитель от постоянного напряжения смещения U_0 .

Для снижения собственной индуктивности элементов делителя конденсатор С3 выполнен из фольгированной полиимидной пленки толщиной 50 мкм, а резистор R3 частично экранирован оплеткой измерительного кабеля. Собственное время нарастания сигнала на выходе делителя, определенное в процессе калибровки, составило ~ 170 пс по уровню 0,1-0,9 от амплитуды. В тракте регистрации использовались ослабители сигнала с полосой пропускания 18 ГГц, а в качестве регистратора – осциллограф DPO 70404C с полосой пропускания 4 ГГц.

Особенность работы резистивного делителя с разделительным конденсатором состоит в том, что нулевой линии на экране осциллографа соответствует напряжение U_0 , до которого в исходном состоянии заряжен конденсатор С3. Кроме того, для корректной регистрации необходимо, чтобы постоянная времени изменения напряжения на С3 при его заряде или разряде через резистор R3 и волновое сопротивление измерительного кабеля были существенно больше длительности исследуемого процесса. В нашем случае постоянная времени изменения напряжения на С3 при R3 ~ 500 Ом составляла ~ 340 нс, при этом исследовались процессы длительностью не более 4 нс. Для исключения влияния индуктивности контактов тиристора, расположенных внутри корпуса прибора, полупроводниковые элементы извлекались из корпуса, и делитель напряжения подключался непосредственно к контактам полупроводниковой пластины.

2.2 Влияние скорости нарастания напряжения

К основным электродам тиристора (анод и катод) прикладывался импульс напряжения наносекундной длительности, обеспечивающий скорость нарастания напряжения на тиристоре в диапазоне 0,5-6,0 кВ/нс. На рисунке 2.3 приведена типичная осциллограмма напряжения на тиристоре в процессе его переключения, а на рисунке 2.4 – набор осциллограмм, иллюстрирующий изменение основных параметров процесса переключения тиристора в зависимости от величины сопротивления $R2$ в цепи запуска. В каждом эксперименте при фиксированном значении $R2$ определялись следующие параметры: время нарастания напряжения до момента переключения тиристора t_r , максимальное значение напряжения на

тиристоре в момент переключения U_m , время перехода тиристора в проводящее состояние (время переключения) t_s , приращение напряжения $\Delta U = U_m - U_0$ и скорость нарастания напряжения $dU/dt = \Delta U/t_r$. Величина начального напряжения смещения U_0 составляла 2 кВ и не изменялась.

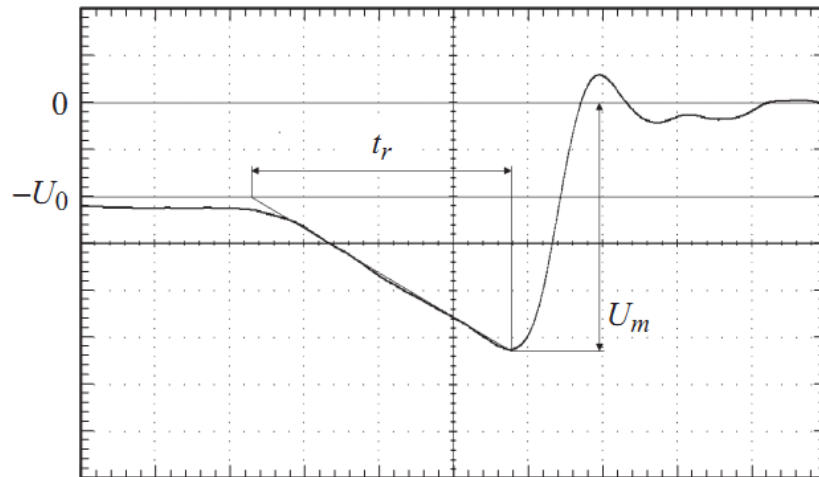


Рисунок 2.3 – Осциллограмма импульса напряжения при переключении тиристора диаметром 32 мм. $U_0 = 2$ кВ, $R_2 = 140$ Ом, масштаб по амплитуде 1 кВ/дел., развертка по времени 500 пс/дел

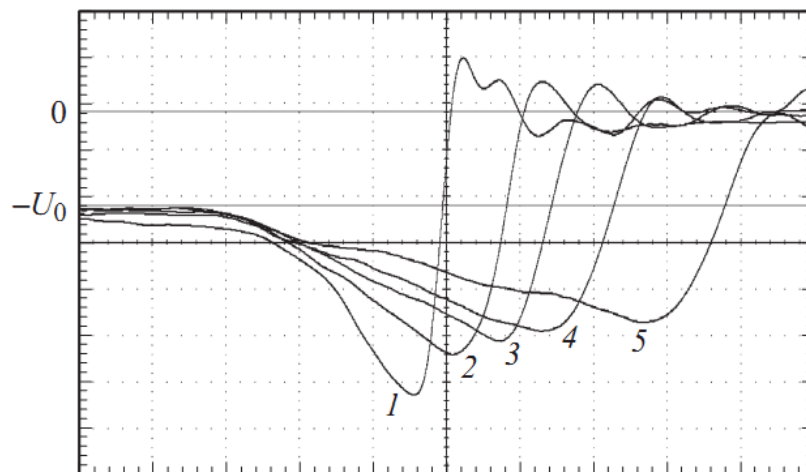


Рисунок 2.4 – Осциллограммы импульсов напряжения при переключении тиристора диаметром 32мм. $U_0 = 2$ кВ, $R_2 = 0$ (1), 88 (2), 196 (3), 297 (4) и 467 (5) Ом. Масштаб по амплитуде 1 кВ/дел., развертка по времени 500 пс/дел

Получение и обработка осциллограмм проводились следующим образом. Итоговая осциллограмма для обработки получалась наложением и усреднением 10 последовательных импульсов. Для определения t_r участок нарастания напряжения на осциллограмме аппроксимировался линейной зависимостью, как это показано на рисунке 2.3. Конечное собственное время нарастания сигнала в тракте регистрации (~ 170 пс) приводит к занижению величины ΔU , регистрируемой на экране осциллографа. В связи с этим при обработке осциллограмм вводилась компенсирующая поправка. При минимальных $t_r \sim 1$ нс поправка для ΔU имела максимальное значение и составляла около 17%, при этом суммарная поправка для величины U_m с учетом напряжения смещения U_0 не превышала 11%. При t_r более 2 нс поправка для U_m не превышала 5%. Время t_s определялось стандартным способом — по уровню 0,1-0,9 от полного перепада напряжения на участке переключения. Всего было снято 6 экспериментальных точек для тиристора диаметром 40 мм и 7 точек для тиристора диаметром 32 мм.

Результаты экспериментов в графическом виде представлены на рисунках 2.5–2.7. Зависимости снимались при изменении величины сопротивления резистора $R2$ в цепи запуска. Увеличение времени t_r (рисунок 2.3) достигалось увеличением сопротивления $R2$ от нуля (крайние левые экспериментальные точки) до ~ 300 Ом для тиристора диаметром 40 мм и ~ 470 Ом для тиристора диаметром 32 мм (крайние правые экспериментальные точки). При более высоких значениях $R2$, когда время t_r становилось более 3,5-4,0 нс, процесс переключения тиристора отсутствовал — после участка нарастания напряжения до величины U_m следовал медленный спад напряжения в течение нескольких наносекунд до исходного значения U_0 .

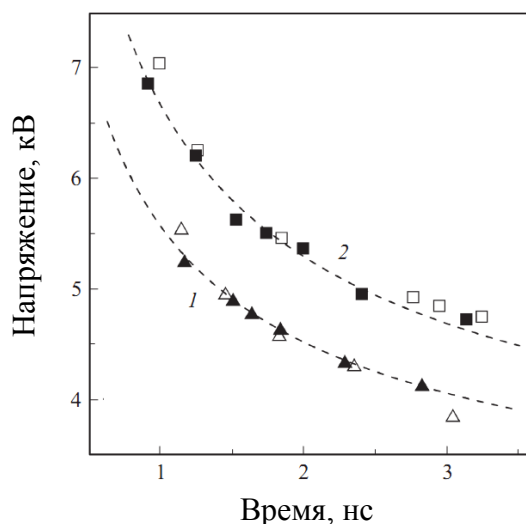


Рисунок 2.5 – Зависимость максимального напряжения от времени его достижения для тиристора диаметром 40 (1) и 32 мм (2). Темные символы – экспериментальные точки, светлые символы – численный расчет, пунктирные кривые – по формуле (2.1)

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

$$U_m = U_0 + (a_{32,40}/t_r)^{1/2}, \quad (2.1)$$

где для тиристора диаметром 32 мм 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 2.5 зависимости (2.1) представлены штриховыми линиями. Усредненное отклонение экспериментальных величин U_m от значений, рассчитанных по (2.1), составило 0,3% для тиристора диаметром 40 мм и 1,2% для тиристора диаметром 32 мм. Здесь же приведены результаты численного расчета, представленного в [48].

На рисунке 2.6 показано влияние скорости нарастания напряжения dU/dt на тиристоре на напряжение переключения U_m . Принимая $dU/dt = \Delta U/t_r$, из (2.1) получаем соответствующее соотношение:

$$U_m = U_0 + (a_{32,40} \cdot dU/dt)^{1/3}. \quad (2.2)$$

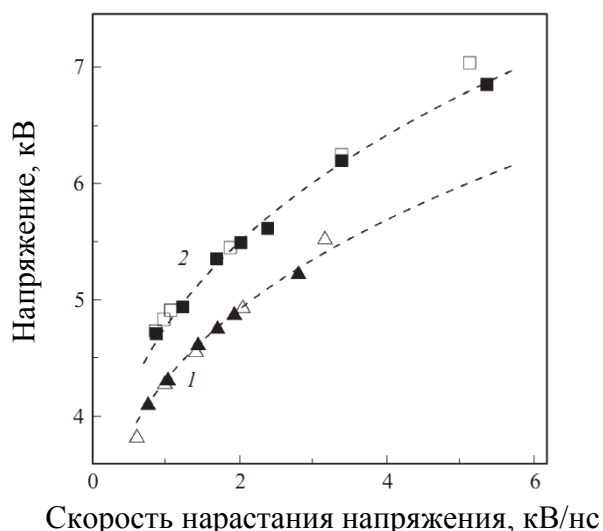


Рисунок 2.6 – Зависимость максимального напряжения от скорости роста напряжения на тиристоре диаметром 40 (1) и 32мм (2). Темные символы – экспериментальные точки, светлые символы – численный расчет, пунктирные кривые – формула (2.2)

Усредненное отклонение экспериментальных величин U_m от значений, рассчитанных по (2.2), составило менее 1% для тиристоров обоих типов.

На рисунке 2.7 (а) экспериментальные данные представлены в виде зависимости времени переключения тиристора t_s от величины U_m . Здесь параметр $\Delta U_{tr}/U_m t_s$ оказался близким к постоянной величине, а соответствующее эмпирическое соотношение записывается в виде:

$$t_s = b_s \cdot \Delta U_{tr} / U_m, \quad (2.3)$$

где постоянная $b_s = 0,286$ является общей для тиристоров диаметром 40 и 32 мм. С учетом (2.1) можно записать:

$$t_s = a_{32,40} b_s / ((U_m - U_0) \cdot U_m). \quad (2.4)$$

Зависимости (2.4) на рисунке 2.7 (а) представлены штриховыми линиями. Усредненное отклонение экспериментальных величин t_s от значений, рассчитанных по (2.4), составило 4,7% для тиристоров обоих типов.

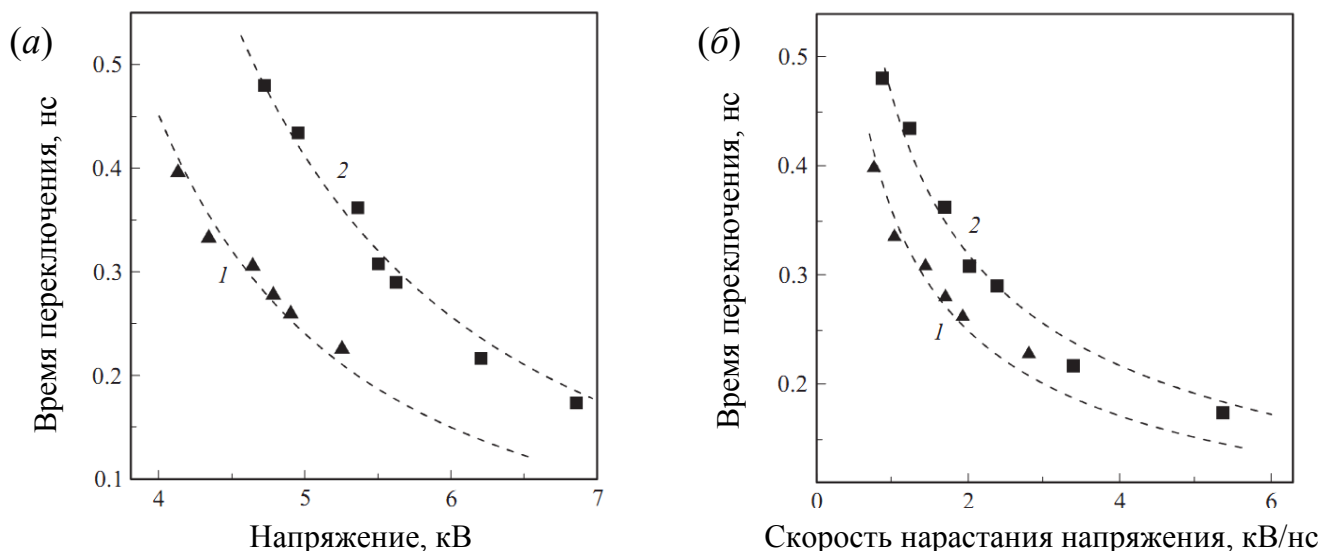


Рисунок 2.7 – зависимость времени переключения от максимального напряжения (а) на тиристоре диаметром 40 (1) и 32мм (2). Символы – экспериментальные точки, пунктирные кривые – по формуле (2.4); зависимость времени переключения от скорости роста напряжения (б) на тиристоре диаметром 40 (1) и 32 мм (2). Символы – экспериментальные точки, пунктирные кривые – расчёт по формуле (2.5)

Рисунок 2.7 (б) иллюстрирует зависимость времени переключения от скорости нарастания напряжения на тиристоре. Эмпирическое соотношение с учетом (2.3) записывается в виде:

$$t_s = b_s (U_m - U_0)^2 / (dU/dt) U_m, \quad (2.5)$$

где величина U_m берется из (2.2). Усредненное отклонение экспериментальных величин t_s от значений, рассчитанных по (2.5), составило менее 5% для тиристоров обоих типов.

Анализ экспериментальных данных также показал, что отношение времени нарастания напряжения к времени переключения t_r/t_s не зависит от диаметра тиристора и удельного сопротивления исходного кремния и слабо изменяется с ростом величины напряжения переключения. Из (2.1) и (2.4) получаем:

$$t_r/t_s = U_m / b_s (U_m - U_0). \quad (2.6)$$

Усредненное отклонение экспериментальных величин t_r/t_s от значений, рассчитанных по (2.6), составило менее 5% для тиристоров обоих типов.

На приведенных выше рисунках представлены экспериментальные зависимости, соответствующие им эмпирические зависимости, а также результаты численных расчетов. Описание расчетной модели и результатов численных расчетов выходит за рамки настоящей диссертационной работы. Здесь мы отметим, что разработка модели и проведение численных расчетов были выполнены Цырановым С.Н., а подробное описание модели можно найти в работах [48], [52].

Обсудим полученные результаты. Процесс переключения тиристора можно разделить на две последовательных стадии – нарастание напряжения до переключения тиристора и спад напряжения на нем при переходе в проводящее состояние. Основные результаты исследования первой стадии приведены на рисунках 2.5 и 2.6, второй – на рисунке 2.7.

Зависимости U_m от t_r (рисунок 2.5) 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 (2.1), полученное в настоящей работе, с точностью до коэффициентов совпадает с эмпирическим соотношением, полученным при исследовании пробоя перенапряженных промежутков в газе [56, с. 141]. [56]

Различное поведение тиристоров разного диаметра на стадии роста напряжения обусловлено различием удельного сопротивления исходного кремния, из которого они были изготовлены. Тиристор диаметром 32 мм ($\rho = 110-120$ Ом·см) при одних и тех же значениях t_r (рисунок 2.5) и dU/dt (рисунок 2.6) имеет на $\sim(10-20)\%$ более высокие экспериментальные значения U_m , чем тиристор диаметром 40 мм ($\rho = 80-85$ Ом·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.

Анализ результатов исследования стадии спада напряжения на тиристоре показал следующее. Из эмпирического соотношения (2.4), описывающего зависимость времени спада напряжения t_s от величины U_m (рисунок 2.7 (а)), следует, что в приближенном виде величина $t_s \sim 1/(U_m - E_b)$ или $t_s \sim 1/(E_m - E_b)$. Эти соотношения подтверждают вывод о том, что процесс спада напряжения обусловлен распространением в структуре тиристора ударно-ионизационных волн, для которых скорость движения фронта пропорциональна величине $(E_m - E_b)$, где E_b – поле стационарного пробоя [57].

Слабая зависимость времени нарастания напряжения к времени его спада t_r/t_s от величины U_m в соотношении (2.6) связана с тем, что увеличение времени t_r влечет за собой снижение величины поля E_m , при котором включается тиристор. Снижение поля замедляет скорость движения ударно-ионизационных волн и, соответственно, увеличивает также и время переключения t_s . Отношение t_r/t_s , называемое коэффициентом обострения импульса, для диодных обострителей достигает ~ 10 [4], [58]. В нашем случае коэффициент обострения находился в диапазоне от 5 до 7.

Результаты численных расчётов [48] в момент спада напряжения на структуре имели значительное расхождение с экспериментальными данными. Вероятно, это связано с неоднородностью распределения тока по площади структуры в момент переключения, которое не учитывалось в модели. Известны работы [57], [59], где для согласования расчетных и экспериментальных данных предполагалось, что ток протекает не по всей площади тиристора, а лишь по её части – активной площади. Такой подход оказался справедлив и в нашем случае.

В работе [52] на основе проведенных численных расчетов было 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 параметра dU/dt определенным образом. А именно, с ростом величины dU/dt

происходит увеличение активной площади структуры. Косвенные экспериментальные подтверждения увеличения активной площади тиристора при увеличении параметра dU/dt приводятся в третьей главе.

В работе [60] был исследован процесс перехода тиристора T143-400-24 в проводящее состояние при возбуждении в нём ударно-ионизационной волны без дальнейшего протекания тока через тиристор. На тиристор подавалось напряжение смещения $U_0 = 2,0$ кВ в прямом направлении, после чего прикладывался импульс перенапряжения в том же направлении от внешнего запускающего генератора, напряжение на тиристоре при этом фиксировалось с помощью резистивного делителя с разделительным конденсатором, описанного в разделе 2.1. Скорость нарастания напряжения изменялась от 0,6 до 5,0 кВ/нс путем введения резистора в цепь запуска.

Осциллограммы напряжений на тиристоре T143-400-24 при исследовании влияния скорости нарастания напряжения dU/dt на процесс коммутации оказались идентичны ранее полученным кривым для тиристора T133-320-22, приведённым на рисунке 2.4. Таким образом, подтверждается важность скорости нарастания напряжения dU/dt в процессе ударно-ионизационного переключения. Увеличение значения dU/dt ведет к увеличению амплитуды напряжения, при котором тиристор переходит в проводящее состояние. Это соответствует увеличению напряженности электрического поля, при которой запускается ударно-ионизационный фронт, что, в конечном счете, увеличивает скорость движения фронта и снижает время перехода тиристора в проводящее состояние (время коммутации). Анализ и обработка полученных осциллограмм показал, что скорость движения ударно-ионизационного фронта в тиристоре в 5-10 раз выше, чем насыщенная скорость движения носителей заряда (для кремния $\sim 10^7$ см/с). Кроме того подтвердилось, что при скорости нарастания напряжения dU/dt менее 1 кВ/нс резко ухудшаются параметры процесса коммутации.

2.3 Совместное влияние скорости нарастания напряжения и температуры структуры

Очевидно, что температура кремниевой структуры должна оказывать влияние на процесс коммутации в режиме ударно-ионизационного фронта. Из работы [4] известно, что охлаждение прибора до температур жидкого азота практически не изменяет характер протекающих процессов, однако при нагреве прибора до критической температуры 370 К эффект переключения исчезает полностью, то есть форма импульса тока через прибор повторяет форму тока запускающего импульса. В литературе не удалось найти экспериментальных данных о том, как увеличение скорости нарастания напряжения на структуре dU/dt и соответственно амплитуда напряжения переключения влияют на критическую температуру. Этот вопрос важен как для понимания физики процессов при возбуждении ударно-ионизационного фронта в полупроводниковых структурах, так и для определения предельных рабочих характеристик коммутаторов, работающих на этом принципе. В данном разделе представлены схема эксперимента и 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.

Схема эксперимента по изучению переключения тиристора из блокирующего в проводящее состояние при различных dU/dt и T показана на рисунке 2.2. В эксперименте использовались низкочастотные кремниевые тиристоры таблеточной конструкции T133-320-22 производства ЗАО "Протон-Электротекс". Данный тиристор имел амплитуду блокируемого напряжения 2,2 кВ и диаметр кремниевой пластины 32 мм. Схема содержала конденсатор $C1 = 0,1$ мкФ заряженный до напряжения смещения $U_0 = 2,2$ кВ отрицательной полярности. Напряжение смещение прикладывалось к исследуемому тиристоры через резистор R1 в постоянном режиме при температурах менее 100 °С и в импульсном режиме при более высоких температурах, в связи с возрастанием тока утечки при увеличении температуры. Для запуска тиристора использовался

генератор SM-200, описанный ранее. Низкоиндуктивный резистор R2 служил для изменения скорости нарастания напряжения dU/dt на тиристоре.

Напряжение на тиристоре измерялось с помощью резистивного делителя включающего в себя высоковольтное плечо резистор R3 и развязку по постоянному напряжению конденсатор C3. В качестве низковольтного плеча делителя использовался тракт передачи сигнала в осциллограф с сопротивлением 50 Ом. Для предотвращения влияния индуктивности корпуса тиристора, полупроводниковый элемент был извлечен из корпуса. Резистивный делитель подключался непосредственно к кремниевой пластине. Внешний нагреватель использовался для нагрева исследуемого тиристора от комнатной температуры 25 °С до 180 °С. Температура кремниевой пластины измерялась посредством термопары, откалиброванной ртутным термометром. Результаты экспериментов приведены на рисунках 2.8-2.11.

Осциллограммы, приведенные на рисунке 2.8 и полученные при комнатной температуре, иллюстрируют, насколько важна скорость нарастания напряжения dU/dt в процессе переключения тиристора. Увеличение значения dU/dt ведет к увеличению амплитуды напряжения, при которой тиристор переходит в проводящее состояние. Это соответствует увеличению напряженности электрического поля, при которой запускается ударно-ионизационный фронт, что, в конечном счете, увеличивает скорость движения фронта и снижает время перехода тиристора в проводящее состояние (время коммутации). Более детально процесс переключения тиристором волной ударной ионизации при комнатной температуре был описан выше в разделе 2.2.

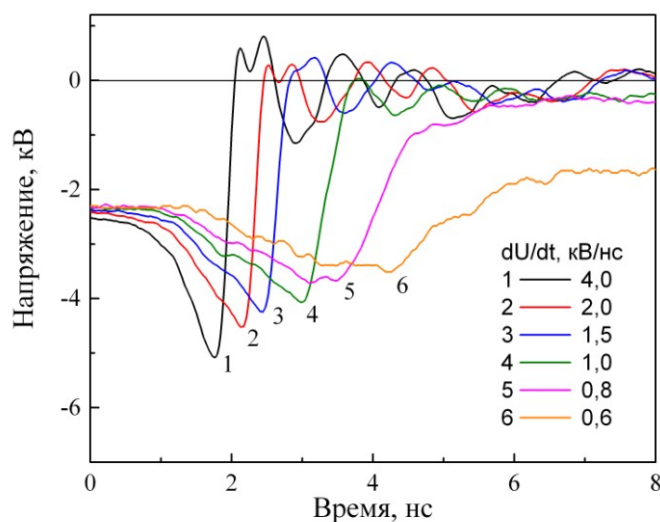


Рисунок 2.8 – Осциллограммы напряжения на тиристоре в ходе процесса переключения при комнатной температуре ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) и различных значениях скорости нарастания напряжения dU/dt

На рисунке 2.9 показано совместное влияние величины dU/dt и температуры структуры на процесс переключения тиристора. При низкой скорости нарастания напряжения (0,8 кВ/нс, рисунок 2.9 (а)) при температурах ниже $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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. Структура начинает работать как обычный лавинный ограничитель напряжения, плавно снижая его величину до исходного уровня напряжения смещения.

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 $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 2.9 (б)). Колебания напряжения на осциллограммах (рисунок 2.9 (б) и рисунок 2.8) после быстрого (субнаносекундного) перехода тиристора в проводящее состояние, наложенные на уровень остаточного напряжения, не связаны с процессами, происходящими внутри полупроводниковой структуры. Колебания обусловлены возбуждением L-С контура, образованного индуктивностью подключения делителя к полупроводниковому элементу (~ 6 нГн) и емкостью обкладок конденсатора СЗ на землю (~ 10 пФ).

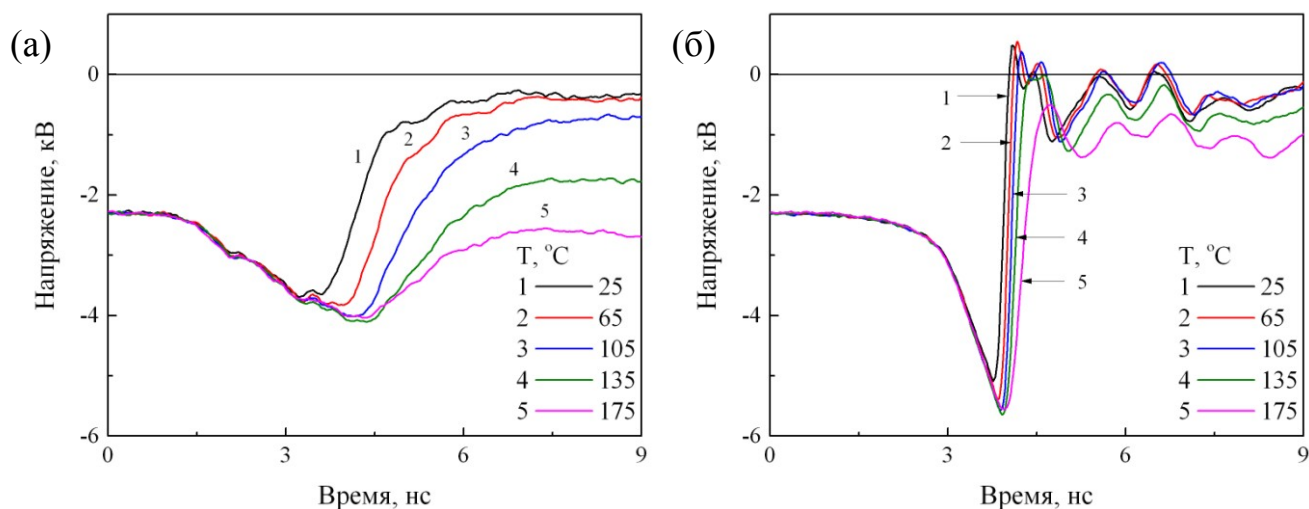


Рисунок 2.9 – Осциллограммы напряжения на тиристоре в ходе процесса переключения при различных температурах: $dU/dt = 0,8$ кВ/нс (а) и $4,0$ кВ/нс (б).

По всей видимости, 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, плавно снижая напряжение до исходного уровня смещения (Рисунок 2.9 (а), кривые 4 и 5). 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.

При фиксированном значении dU/dt с ростом температуры происходит увеличение величины U_m , при которой начинается процесс переключения. Такое поведение величины U_m наблюдается до температуры ~ 140 °С и связано со снижением длины свободного пробега носителя с ростом температуры. Однако, при дальнейшем повышении температуры величина U_m начинает снижаться. Кроме этого, при фиксированном значении dU/dt рост температуры ведет к увеличению остаточного напряжения и времени перехода тиристора в проводящее состояние (рисунок 2.9).

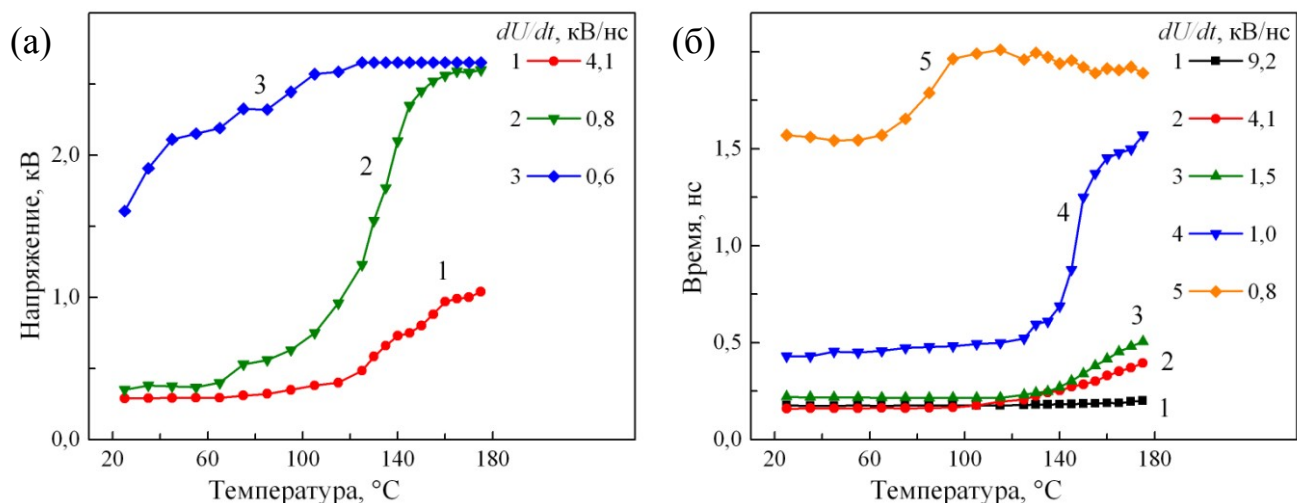


Рисунок 2.10 – Зависимости остаточного напряжения на тиристоре (а) и времени переключения (б) от температуры структуры при разных значениях скорости нарастания напряжения dU/dt

Графики на рисунке 2.10 иллюстрируют процесс исчезновения эффекта волнового переключения тиристора с ростом температуры в координатах остаточного напряжения (рисунок 2.10 (а)) и времени перехода в проводящее состояние (рисунок 2.10 (б)). Кривая 2 на рисунке 2.10 (а) и кривая 4 на рисунке 2.10 (б) соответствуют переходу от волнового режима переключения к обычному лавинному при скорости нарастания напряжения около 1 кВ/нс. При увеличении dU/dt процесс переключения тиристора в режиме волны ударной ионизации сохраняется во всем температурном диапазоне. Так, время переключения тиристора при скорости нарастания напряжения $dU/dt \sim 9$ кВ/нс (кривая 1 на рисунке 2.10 (б)) практически не зависит от температуры и не превышает 250 пс при $T = 175$ °C.

2.4 Выводы по второй главе

В ходе выполнения экспериментов, описанных во второй главе диссертационной работы, исследовались процессы на стадии переключения тиристорov с ударно-ионизационным механизмом запуска без дальнейшего протекания силового тока через структуру. Использовались промышленные кремниевые тиристоры таблеточной конструкции с диаметрами полупроводниковой пластины 32 и 40 мм.

Для этих тиристоров изучено влияние скорости нарастания напряжения dU/dt на процесс переключения. Эксперименты проводились при комнатной температуре и начальном напряжении смещения $U_0 = 2$ кВ. Получен ряд эмпирических соотношений описывающих зависимость времени коммутации t_s и максимального напряжения на структуре U_m перед началом переключения от скорости нарастания напряжения dU/dt .

Главный результат заключается в том, что 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 . 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 $\sim 4,5$ до $\sim 7,0$ кВ и снижению времени перехода в проводящее состояние с ~ 500 до ~ 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 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.

ГЛАВА 3

СТАДИЯ ПРОТЕКАНИЯ ТОКА

3.1 Переключение тока со скоростью нарастания выше 100 кА/мкс

Эффект возбуждения в полупроводниковых структурах ударно-ионизационного фронта позволяет создавать ключи с параметрами коммутации, недоступными подавляющему большинству твердотельных коммутаторов. Такие параметры как максимальная скорость нарастания и амплитуда тока, блокируемое напряжение, коммутируемая энергия, время коммутации чрезвычайно важны при создании мощных импульсных генераторов. Поэтому значительная часть диссертационной работы посвящена прикладным задачам по разработке и исследованию мощных коммутаторов на основе кремниевых тиристоров при их запуске в режиме ударно-ионизационного фронта. В частности третья глава посвящена исследованию таких коммутаторов на стадии протекания силового тока.

Максимальная скорость нарастания тока dI/dt – это один из основных параметров коммутатора, который определяет степень сжатия энергии при компрессии энергии и увеличении мощности импульса. Достижение максимально возможного сжатия энергии во времени представляет собой основную задачу мощной импульсной техники, поэтому над повышением параметра dI/dt коммутирующих устройств ведутся работы во многих исследовательских центрах и организациях.

Одна из задач диссертационной работы заключалась в экспериментальном исследовании возможности запуска серийных тиристоров таблеточной конструкции импульсом перенапряжения с коротким фронтом, обеспечивающим процесс переключения тиристора в режиме ударно-ионизационной волны с последующим пропуском разрядного тока со скоростью нарастания $dI/dt > 100$ кА/мкс. Результаты наших исследований по данному вопросу изложены в работах [14], [48], [51], [61], [62] и [63]. Рассмотрим эти результаты более подробно.

Электрическая схема экспериментальной установки для пропускания через тиристор тока с большими значениями dI/dt приведена на рисунке 3.1. Емкостный накопитель C заряжается от источника постоянного напряжения U_0 отрицательной полярности. После запуска исследуемого тиристора T накопитель разряжается на резистивную нагрузку R , сопротивление которой выбрано близким к волновому сопротивлению разрядного контура. Индуктивность L представляет собой собственную индуктивность контура. Измеренные параметры элементов разрядного контура имеют следующие величины: $C - 2$ мкФ, $L - 0,1$ мкГн, $R - 0,25$ Ом.

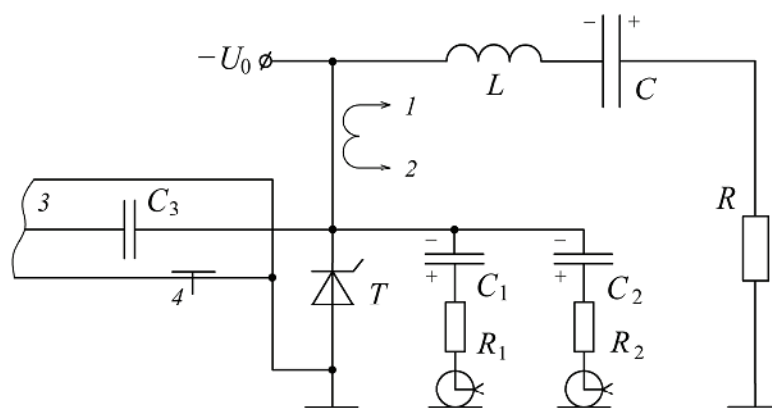


Рисунок 3.1 – Электрическая схема. T – исследуемый тиристор; $C - K75-74$, $0,1$ мкФ, 20 кВ (19 параллельно), $C_1 - 0,26$ нФ, $C_2 - K78-2$, 15 нФ, 2 кВ (10 параллельно), $C_3 - KВИ-3$, 4700 пФ, 12 кВ; $R - ТВО-2$, $5,6$ Ом (21 параллельно), $R_1 - ТВО-0,25$, 1 кОм (2 параллельно), $R_2 - ТВО-0,25$, $1,1$ кОм; L – индуктивность разрядного контура (~ 100 нГн); $1-2$ – пояс Роговского; 3 – выход генератора импульсов запуска; 4 – емкостный датчик

Для запуска тиристора использовался малогабаритный твердотельный SOS-генератор SM-200 [54]. Выходной узел генератора представляет собой коаксиальную 50 -омную маслонеполненную линию (3 на рисунке 3.1). Импульс запуска отрицательной полярности подается на тиристор через разделительный конденсатор C_3 , установленный внутри линии 3 , и регистрируется с помощью емкостного датчика 4 . Поступающий импульс запуска воздействует только на

тиристор, поскольку элементы C и R блокированы индуктивностью контура L , а источник питания с напряжением U_0 подключен через зарядный резистор.

Для регистрации импульса тока в разрядном контуре служит пояс Роговского 1–2. Напряжение на тиристоре регистрируется с помощью двух резистивных делителей напряжения, верхним плечом которых выступают резисторы R_1 и R_2 , а нижнее плечо образовано кабелем регистрации с волновым сопротивлением 50 Ом. Конденсаторы C_1 и C_2 изолируют делители от зарядного напряжения U_0 .

Эскизная компоновка элементов экспериментального стенда представлена на рисунке 3.2. Разрядный контур выполнен в коаксиальном варианте. Цилиндрическая образующая содержит накопительные конденсаторы 1, расположенные между электродами 2 и 3 с наружным диаметром 400 мм. Вдоль центральной оси контура расположены тиристоры 4 и токоведущие стержни 5, на одном из которых закреплен пояс Роговского 6. Резисторы нагрузки 7 распаяны радиально в центральном отверстии электрода 3. Высота конструкции – 300 мм. Экспериментальный стенд позволяет устанавливать различное количество исследуемых тиристоров без изменения геометрии конструкции. В экспериментах количество тиристоров варьировалось от 1 до 6. Резистивный узел 7 обеспечивает возможность изменения сопротивления нагрузки в широких пределах. Максимальное рабочее напряжение стенда 20 кВ ограничено конденсаторами 1.

В экспериментах с одиночным тиристором исследовались тиристоры таблеточной конструкции марки Т343-500-20 производства ЗАО «Протон-Электротекс». Основные рабочие характеристики тиристоров: рабочее напряжение – 2 кВ, амплитуда ударного тока – 8 кА, критическая скорость нарастания тока при включении по управляющему электроду – 0,4 кА/мкс, диаметр полупроводникового элемента – 40 мм (рисунок 2.1 (а)). Для сравнительной оценки также испытывались тиристоры марки Т133-320-20 с тем же рабочим напряжением, но имеющие диаметр полупроводникового элемента 32 мм. Параметры по ударному току и критической скорости нарастания тока для Т133-320-20 – 6 кА и 100 А/мкс соответственно.

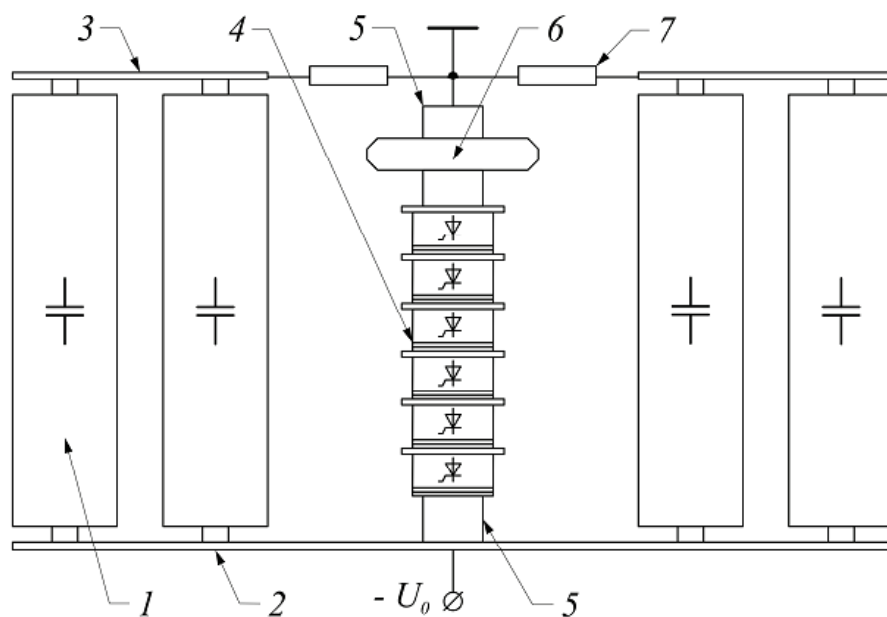


Рисунок 3.2 – Эскизная компоновка элементов разрядного контура. 1 – накопительные конденсаторы; 2, 3 – электроды; 4 – тиристоры; 5 – токоведущие стержни; 6 – пояс Роговского; 7 – резистор нагрузки

Процесс переключения тиристоров в проводящее состояние исследовался с помощью резистивного делителя с элементами C_1 и R_1 (рисунок 3.1). Для снижения собственной индуктивности элементов делителя конденсатор C_1 (260 пФ) выполнен из фольгированной полиимидной пленки толщиной 100 мкм, а резистор R_1 (500 Ом) частично экранирован оплеткой измерительного кабеля. Собственное время нарастания сигнала на выходе делителя, определенное в процессе калибровки, составило ~ 200 пс. Постоянная времени изменения напряжения на C_1 составляла ~ 150 нс, при этом исследовались процессы длительностью 1,0-1,5 нс. Для исключения влияния собственной индуктивности контактов тиристора, расположенных внутри корпуса прибора, полупроводниковые элементы извлекались из корпуса, и делитель напряжения подключался непосредственно к контактам структуры.

Типичные осциллограммы напряжения на структуре тиристора в процессе переключения при $U_0 = 2$ кВ приведены на рисунке 3.3. Поскольку перед включением полупроводниковая структура представляет собой нелинейную емкость, напряжение на структуре меньшей площади (кривая 1, диаметр 32 мм)

нарастает быстрее, чем на структуре большей площади (кривая 2, диаметр 40 мм). Для определения максимального напряжения включения структуры использовалась процедура восстановления формы импульса напряжения с учетом собственного времени нарастания сигнала в системе регистрации. Для структуры диаметром 40 мм эта величина составила 5,7 кВ, для 32 мм – 8 кВ.

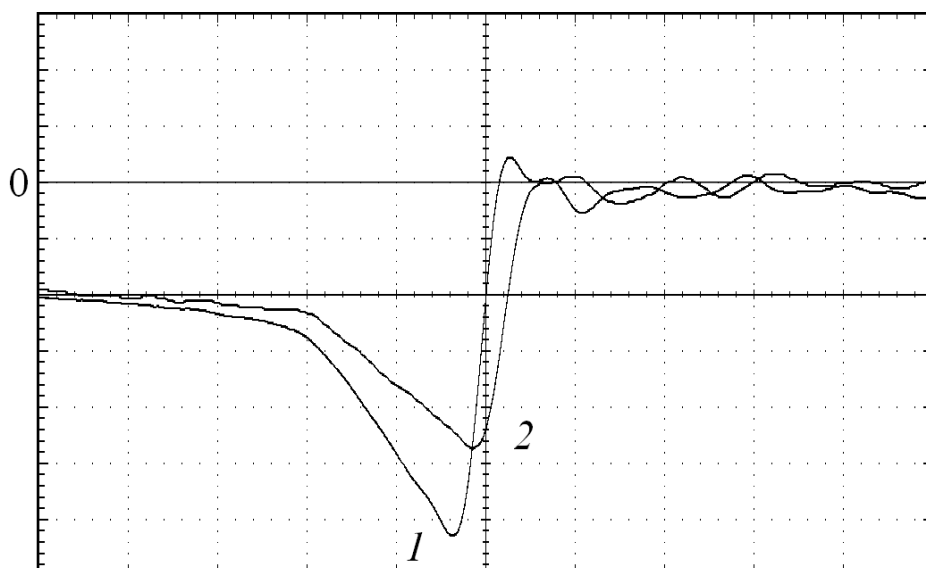


Рисунок 3.3 – Осциллограммы импульсов напряжения на тиристоре с диаметром структуры 32 мм (1) и 40 мм (2). Масштаб по вертикали – 1 кВ/деление, по горизонтали – 625 пс/деление

На осциллограммах, приведённых на рисунке 3.3, процессу переключения тиристора в проводящее состояние соответствует стадия спада напряжения от максимального до близкого к нулевому значению. Длительность спада составляет ~240 пс и близка к собственному времени нарастания сигнала в измерительной системе. С учетом полосы пропускания системы регистрации можно полагать, что собственное время переключения исследованных структур в условиях настоящего эксперимента не превышало 200 пс.

Полученные осциллограммы позволяют приблизительно оценить среднюю скорость движения ударно-ионизационной волны в процессе переключения структуры в проводящее состояние. Полагая, что перед включением структуры электрическое поле занимает всю ширину базовых областей, которая для силовых

тиристоров данного класса напряжения лежит в диапазоне 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).

При исследовании одиночных тиристоров на стадии прохождения через них тока разряда емкостного накопителя использовался делитель с элементами $C_2 = 0,15$ мкФ и $R_2 = 1,1$ кОм. Корпуса тиристоров стягивались с рекомендуемым осевым усилием сжатия $F = 14$ кН. Вывод управляющего электрода тиристоров не использовался и оставался разомкнутым.

Осциллограммы импульсов на стадии разряда накопителя через тиристор с диаметром структуры 40 мм приведены на рисунке 3.4. Основные потери энергии в тиристорах, как и в ДГУ [10], [13], происходят на стадии модуляции базовых областей структуры. При напряжении накопителя 2 кВ для тиристоров диаметром 40 мм амплитуда тока составила 4,6 кА, потери энергии 0,17 Дж, а для тиристоров диаметром 32 мм – 4,2 кА и 0,4 Дж соответственно. Длительность импульса тока на полувывсоте составила ~ 1 мкс, а начальная скорость роста тока – около 18 кА/мкс для обоих типов тиристоров.

В экспериментах со сборками использовались тиристоры с диаметром структуры 40 мм, имеющие меньшие потери энергии. Тиристоры соединялись последовательно в количестве до 6 штук. Зарядное напряжение по последовательно соединенным тиристорам равномерно распределялось с помощью резисторов и варисторов. Управляющие электроды тиристоров 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 в сборке для определения суммарных потерь энергии. При расчете потерь энергии из осциллограммы напряжения вычиталась индуктивная компонента падения напряжения на тиристоре.

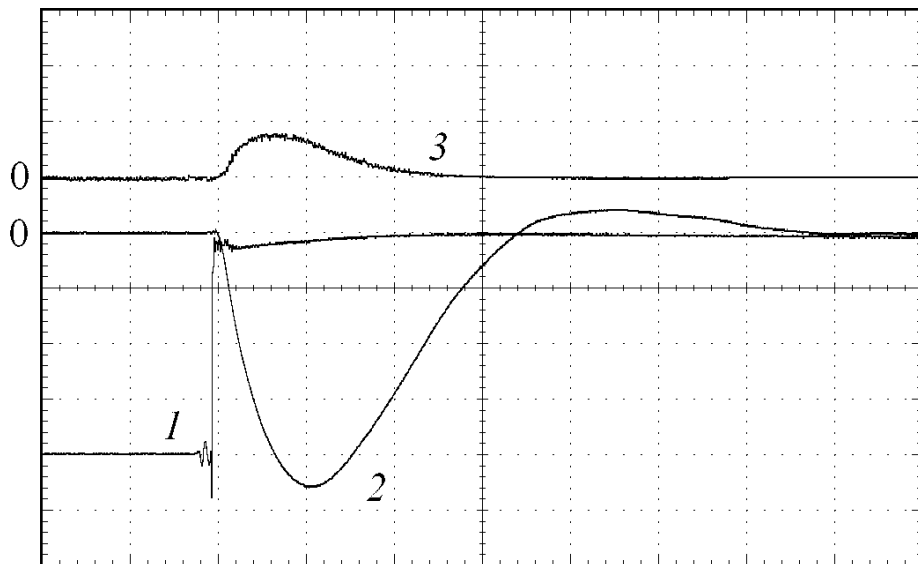


Рисунок 3.4 – Осциллограммы импульсов: 1 – напряжения (500 В/деление), 2 – тока (1 кА/деление) и 3 – мощности потерь (530 кВт/деление) для тиристора с диаметром структуры 40 мм. Масштаб по времени – 500 нс/деление

В более поздних наших работах [51], [63] количество последовательно соединенных тиристоров было увеличено до 9 штук, а зарядное напряжение до 20 кВ. На рисунке 3.5 приведены осциллограммы тока, напряжения и мощности потерь при максимальных параметрах тиристорного коммутатора, достигнутых на данном экспериментальном стенде.

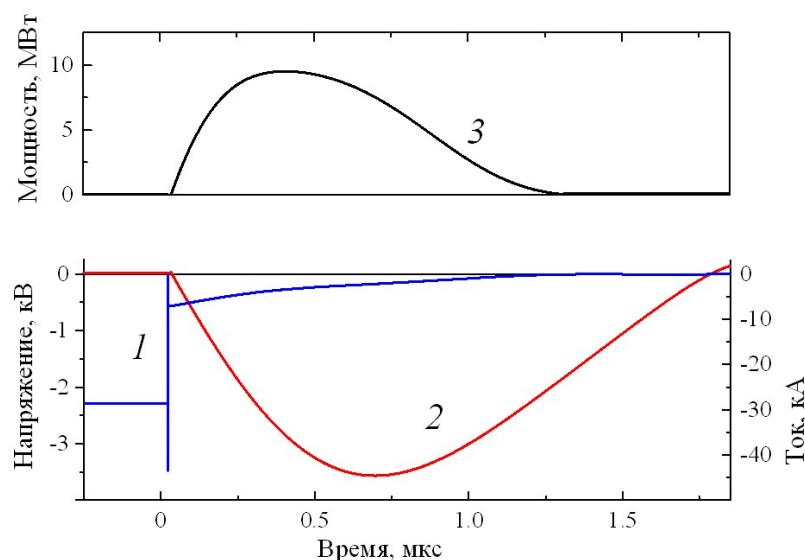


Рисунок 3.5 – Осциллограммы напряжения (1), тока (2) и мощности потерь (3) для одного тиристора Т343-500-20 с диаметром структуры 40 мм (последовательная сборка из 9 тиристоров, зарядное напряжение 20 кВ)

Результаты экспериментов сведены в таблицу 3.1, в которой приняты следующие обозначения: N_T – количество тиристоров в сборке, U_0 – зарядное напряжение накопителя, W_C – энергия накопителя, W_T – суммарные потери энергии в тиристорах, I_m – амплитуда разрядного тока, $(dI/dt)_m$ – максимальная скорость нарастания тока, P_m – пиковое значение мощности в нагрузке, $\eta = 1 - W_T/W_C$ – эффективность процесса переключения.

Таблица 3.1 – Результаты экспериментов с тиристорными сборками

N_T , шт	1	3	5	6	6	9
U_0 , кВ	2	6	10	12	13	20
W_C , Дж	4	36	100	144	169	400
W_T , Дж	0,17	3,6	11,5	18,2	20,1	60
I_m , кА	4,6	13,5	22,1	25,6	27,6	45
$(dI/dt)_m$, кА/мкс	18,7	55	88	106	113	134
P_m , МВт	5,3	45,6	122	164	190	344
η	0,96	0,90	0,89	0,87	0,88	0,85

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 полувывсоте – 1 мкс, пиковая мощность в нагрузке – 344 МВт. Эффективность переключения в исследованных режимах работы 0,85, для ее повышения до стандартных для силовых полупроводниковых приборов значений в диапазоне 0,95-0,98 необходимо согласовывать конструктивные параметры тиристора, в первую очередь диаметр полупроводникового элемента, и параметры режима разряда накопителя – амплитуду и длительность импульса тока. 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.

За время проведения экспериментов было произведено несколько тысяч включений тиристоров. Выхода из строя тиристоров или изменения их рабочих характеристик не наблюдалось.

3.2 Коммутация емкостных накопителей с запасаемой энергией 12 кДж и разрядным током 200 кА

Были проведены эксперименты [49], [51], [63], [64], [65] по коммутации кремниевым тиристором большой площади импульсов тока микросекундного диапазона с амплитудой более 100 кА 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, ударный ток в открытом состоянии – 20 кА, критическая скорость нарастания тока – 400 А/мкс, диаметр кремниевой пластины равен 56 мм.

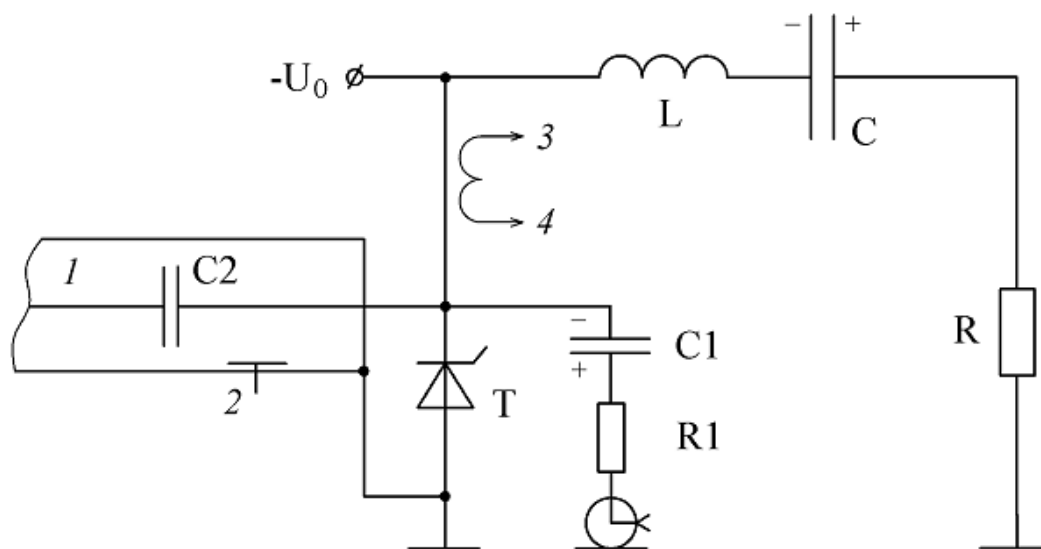


Рисунок 3.6 – Экспериментальная схема. Т – Т253-800-24 (2 последовательно); С – ёмкостный накопитель энергии (К41И-7, 100 мкФ, 5 кВ, 4 параллельно), С1 – К75-90, 0,22 мкФ, 10 кВ (2 параллельно), С2 – КВИ-3, 4700 пФ, 12 кВ; R – резистивная нагрузка, R1 – ТВО-5, 10 кОм; L – индуктивность контура; 3-4 – пояс Роговского; 1 – выход генератора импульсов запуска; 2 – ёмкостный датчик

Электрическая схема экспериментальной установки представлена на рисунке 3.6. В качестве генератора запуска используется SOS-генератор SM-200, описанный выше. Система измерения позволяет измерять ток посредством пояса Роговского 3-4 и напряжение на тиристорах с помощью резистивного делителя. Делитель напряжения состоит из высоковольтного плеча R_1 и низкоиндуктивного конденсатора C_1 для развязки по постоянному напряжению. Постоянная времени ~ 450 мкс. Низковольтное плечо образовано измерительным кабелем, подключенным к ослабителю сигнала с входным сопротивлением 50 Ом.

В эксперименте использовались конденсаторы К-41И-7 с рабочим напряжением 5 кВ и ёмкостью 100 мкФ. Накопитель энергии представляет собой параллельное соединение четырёх таких конденсаторов. Измеренные значения разрядного контура следующие: $C = 430$ мкФ, $L = 150$ нГн, $R = 26$ мОм. Резистивный делитель напряжения был подключен параллельно двум тиристорам. Рисунок 3.7 показывает осциллограммы тока, напряжения и мощности потерь, полученные при зарядном напряжении 4,8 кВ, что соответствует накопленной в емкостном накопителе энергии 5 кДж.

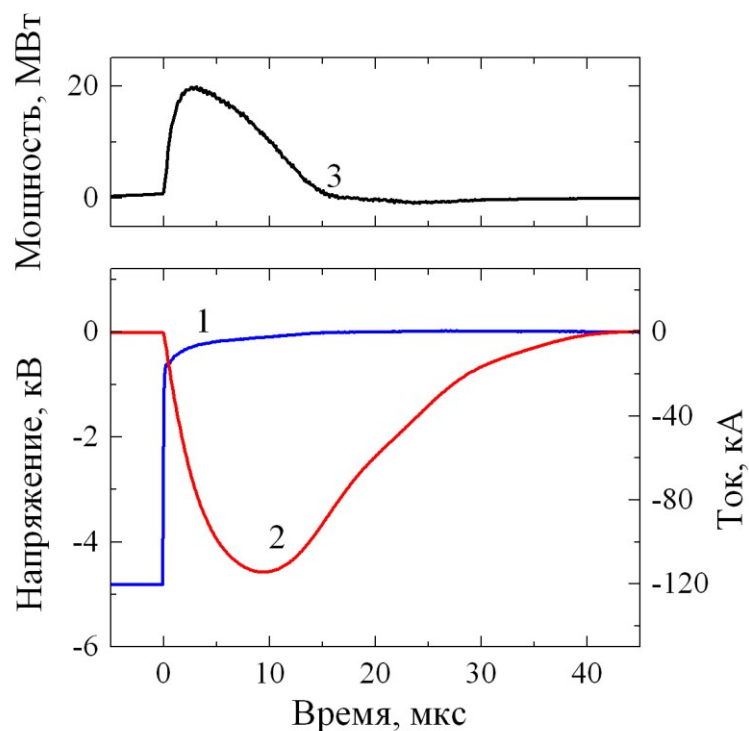


Рисунок 3.7 – Осциллограммы импульсов напряжения (1), тока (2) и мощности потерь (3) для тиристоров T253-800-24 (2 последовательно)

Следующие результаты были получены: максимальная амплитуда разрядного тока составила 114 кА, максимальная скорость нарастания тока – 32 кА/мкс, время нарастания импульса по уровню 0,1-0,9 равно 5,2 мкс, длительность импульса по основанию – 40 мкс. Эффективность переключения коммутатора составила 0,96. В ходе экспериментов было произведено несколько сотен импульсов, изменений параметров тиристорных не наблюдалось.

Далее были проведены экспериментальные исследования тиристорных Т253-800-24 при коммутации импульсов тока микросекундной длительности амплитудой свыше 200 кА и запасаемой энергии накопителя более 10 кДж. Было исследовано влияние скорости нарастания напряжения dU/dt на предельную амплитуду коммутируемого тока. На основании полученных данных произведена оценка активной площади тиристорной структуры.

Компоновка экспериментальной установки приведена на рисунке 3.8, а её электрическая схема на рисунке 3.9. Емкостный накопитель состоит из шести идентичных модулей с конденсаторами C_1-C_6 (1 на рисунке 3.9), расположенных радиально. В центре образованной окружности располагается исследуемый тиристорный коммутатор Т (2 на рисунке 3.9). В каждом модуле установлена резистивная нагрузка R_1-R_6 (3 на рисунке 3.9), выполненная из нихромовой ленты шириной 40 мм и сложенная бифилярно для снижения индуктивности. Сопротивление нагрузки подобрано близким к волновому сопротивлению модуля. Индуктивности L_1-L_6 представляют собой собственную индуктивность модулей, равную ~330 нГн. Измеренное значение емкости каждого модуля ~210 мкФ, при зарядном напряжении $U_0 = 5$ кВ запасаемая энергия всего накопителя составляет ~15 кДж.

Для запуска коммутатора использовался малогабаритный твердотельный генератор SM-3NS (4 на рисунке 3.8), выходной узел которого представлял собой коаксиальную 50-омную маслonaполненную линию (3 на рисунке 3.9). Импульс запуска отрицательной полярности подавался на коммутатор через разделительный конденсатор C_9 , установленный внутри коаксиальной линии 3, и регистрировался с помощью емкостного датчика 4. Амплитуда импульса

генератора на согласованной 50-омной нагрузке регулируется в диапазоне от 50 до 100 кВ, фронт импульса по уровню 0,1-0,9 от амплитуды ~ 1 нс, длительность импульса на полувысоте ~ 4 нс.

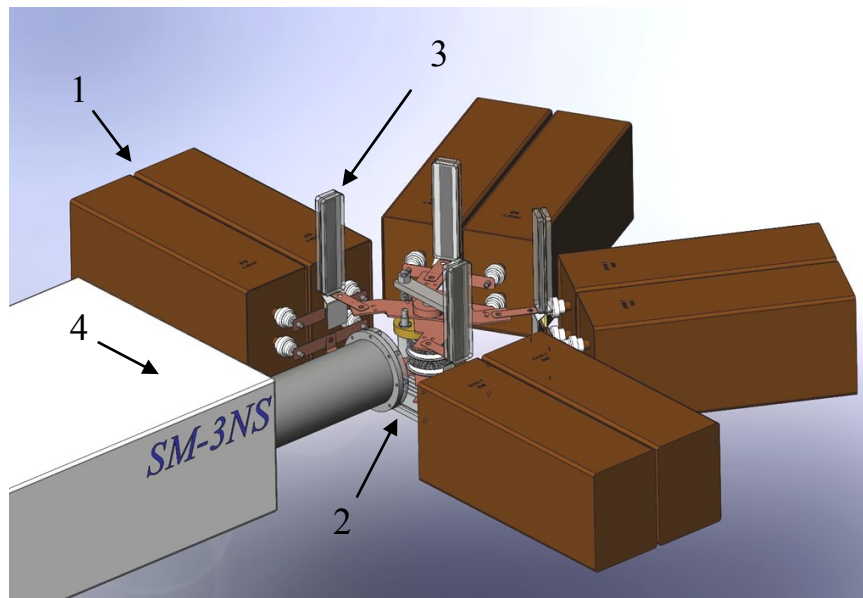


Рисунок 3.8 – Эскизная компоновка экспериментальной установки, состоящей из 4-х модулей

Поступающий импульс запуска воздействует в основном на коммутатор Т, поскольку элементы С и R в модуле блокированы его индуктивностью, а источник питания с напряжением U_0 подключен через зарядный резистор. Для дополнительной развязки модулей от цепи запуска на токовую шину каждого модуля, которая подключает модуль к катоду тиристорного ключа, надеты три ферритовых кольца марки 1000НН размерами $65 \times 40 \times 15$ мм (на рисунке 3.9 не показаны).

Для регистрации импульса тока через исследуемый коммутатор служит пояс Роговского 1-2. Напряжение на тиристорном ключе регистрируется с помощью двух резистивных делителей напряжения, верхним плечом которых являются резисторы R_7 и R_8 , а нижнее плечо образовано системой регистрации с волновым сопротивлением 50 Ом. Конденсаторы C_7 и C_8 изолируют делители от зарядного напряжения U_0 .

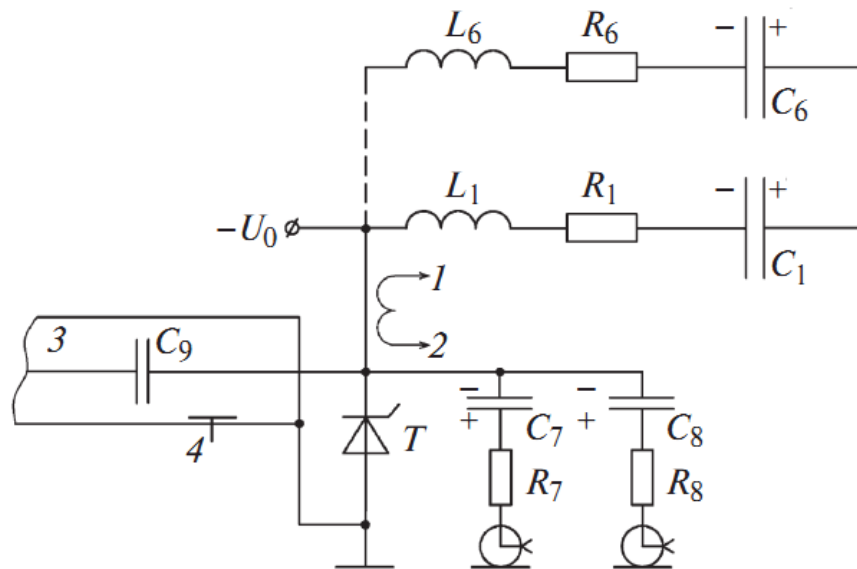


Рисунок 3.9 – Экспериментальная схема. Т – Т253-800-24 (2 последовательно); C_1 - C_6 – конденсатор модуля (К41И-7, 100 мкФ, 5 кВ, 2 параллельно), C_7 – 0,11 нФ, C_8 – К75-90, 0,22 мкФ, 10 кВ (2 параллельно), C_9 – КВИ-3, 4700 пФ, 12 кВ; R_1 - R_6 – резистивная нагрузка модуля (~ 70 мОм), R_7 – ТВО-0,5, 1 кОм (2 параллельно), R_8 – ТВО-5, 10 кОм; L_1 - L_6 – индуктивность модуля (~ 330 нГн); 1-2 – пояс Роговского; 3 – выход генератора импульсов запуска; 4 – емкостный датчик

Делитель с элементами C_7 , R_7 служит для регистрации импульса запуска тиристорного ключа длительностью ~ 4 нс. Для снижения собственной индуктивности элементов делителя конденсатор C_7 выполнен из фольгированной полиимидной пленки, что снижает его индуктивность по сравнению с промышленными конденсаторами, а резистор R_7 для компенсации его индуктивности частично экранирован оплеткой измерительного кабеля. Пробивное напряжение конденсатора C_7 не менее 10 кВ. Собственное время нарастания сигнала на выходе делителя, определенное в процессе калибровки, составило ~ 300 пс по уровню 0,1-0,9 от амплитуды. Делитель с элементами C_8 , R_8 регистрирует напряжение на коммутаторе в микросекундном диапазоне времени в процессе прохождения импульса тока. При обработке осциллограмм вычитается индуктивная компонента падения напряжения на коммутаторе.

Тиристорный коммутатор также состоит из двух последовательно соединенных тиристоров таблеточной конструкции Т253-800-24 с диаметром полупроводникового элемента 56 мм. Тиристоры стягивались с рекомендуемым осевым усилием сжатия 26 кН. Зарядное напряжение по тиристорам равномерно распределялось с помощью цепочек из резисторов и варисторов, а управляющие электроды тиристоров оставались разомкнутыми. Ток распределительных цепей на порядок превышал собственный ток утечки тиристоров. Импульс запуска подавался на всю сборку из двух тиристоров.

В экспериментах тиристорный коммутатор запускался в режиме ударно-ионизационной волны с различными значениями скорости нарастания пускового напряжения dU/dt (рисунок 3.10). Кривая 1 соответствует минимальной скорости, при которой еще происходит включение тиристоров, а кривая 3 – максимальной скорости, которую позволял получить пусковой генератор. Величина dU/dt регулировалась изменением амплитуды пускового импульса в линии 3 (рисунок 3.9), а для получения минимального значения dU/dt (1 на рисунке 3.10) дополнительно использовался резистор, включаемый между выходом линии и коммутатором. Колебания напряжения на осциллограммах после переключения тиристоров обусловлены возбуждением LC -контура, образованного индуктивностью коммутатора (~ 6 нГн) и паразитной емкостью обкладок конденсатора C_7 на землю (~ 10 пФ).

Для определения максимального напряжения включения коммутатора U_m и величины dU/dt использовалась процедура восстановления формы импульса напряжения с учетом собственного времени нарастания сигнала делителя (~ 300 пс). После обработки осциллограмм были получены следующие значения U_m и dU/dt : 8,2 кВ и 1 кВ/нс (0,5 кВ/нс на один тиристор) – кривая 1 на рисунке 3.10; 10,5 кВ и 2,6 кВ/нс (1,3 кВ/нс) – кривая 2; 13,0 кВ и 6,0 кВ/нс (3,0 кВ/нс) – кривая 3.

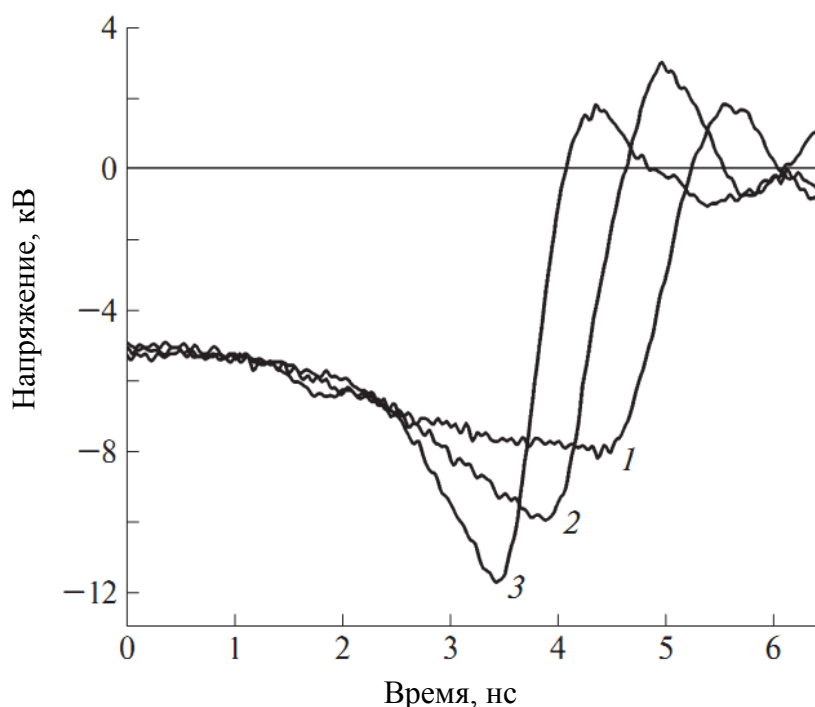


Рисунок 3.10 – Осциллограммы импульсов напряжения в процессе переключения коммутатора. Максимальное напряжение включения U_m и скорость нарастания напряжения dU/dt после обработки осциллограмм: 1 – 8,2 кВ и 1 кВ/нс (0,5 кВ/нс на один тиристор), 2 – 10,5 кВ и 2.6 кВ/нс (1,3 кВ/нс), 3 – 13,0 кВ и 6,0 кВ/нс (3,0 кВ/нс)

Амплитуда тока через коммутатор регулировалась дискретно с шагом 10-20 кА путем изменения числа модулей в накопителе, изменением сопротивления нагрузки в модулях и в более узком диапазоне изменением величины U_0 в пределах 4,8-5,0 кВ. При включении шести модулей, заряженных до $U_0 = 5$ кВ, и суммарной нагрузке 12 мОм накопитель обеспечивал максимальную амплитуду импульса тока 270 кА со скоростью нарастания 70 кА/мкс с длительностью импульса на полувысоте ~ 23 мкс.

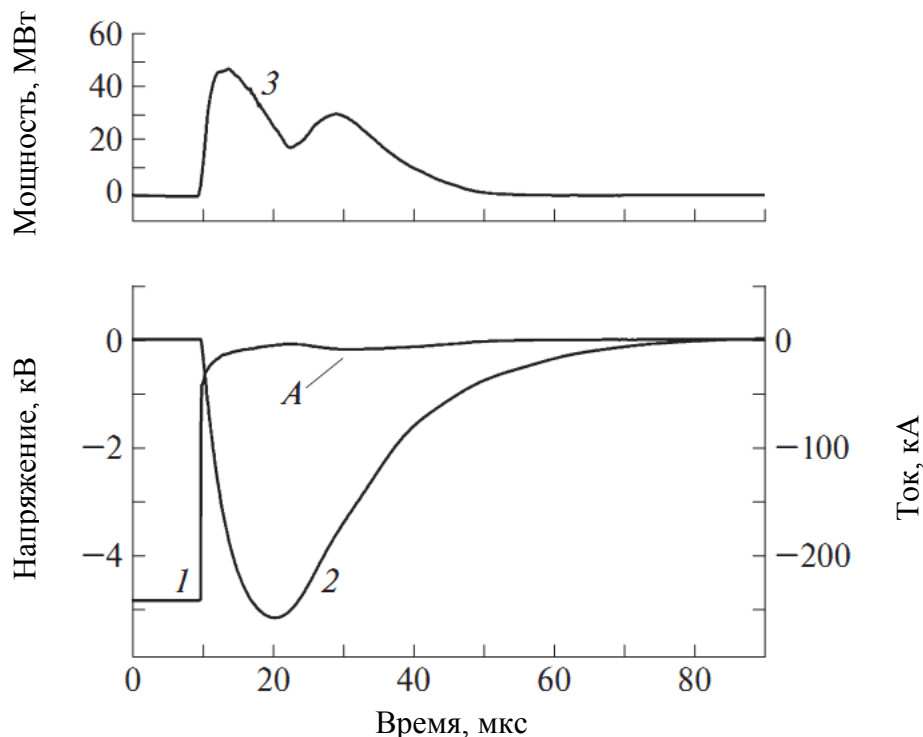


Рисунок 3.11 – Осциллограммы импульсов напряжения (1), тока (2) и мощности потерь (3) при пробое тиристорного коммутатора. Тиристоры Т253-800-24 (2 последовательно), импульс запуска – кривая 3 на рисунке 3.10

Для трех фиксированных режимов запуска (рисунок 3.10) амплитуда тока через коммутатор увеличивалась до значения, при котором происходил выход тиристоров из строя. Рисунок 3.11 иллюстрирует типичные осциллограммы, получаемые при пробое тиристоров импульсом тока. В этом эксперименте накопитель содержал 6 модулей, заряженных до $U_0 = 4,8$ кВ, амплитуда тока через коммутатор – 260 кА, скорость нарастания тока – 67 кА/мкс, режим запуска – кривая 3 на рисунке 3.10.

Эксперименты показали, что амплитуда импульса тока, при которой тиристоры выходят из строя (далее – ток пробоя 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 3.12) и почти двукратному увеличению выделяющейся в тиристоре энергии W_T – от 112 до 212 Дж (кривая 3).

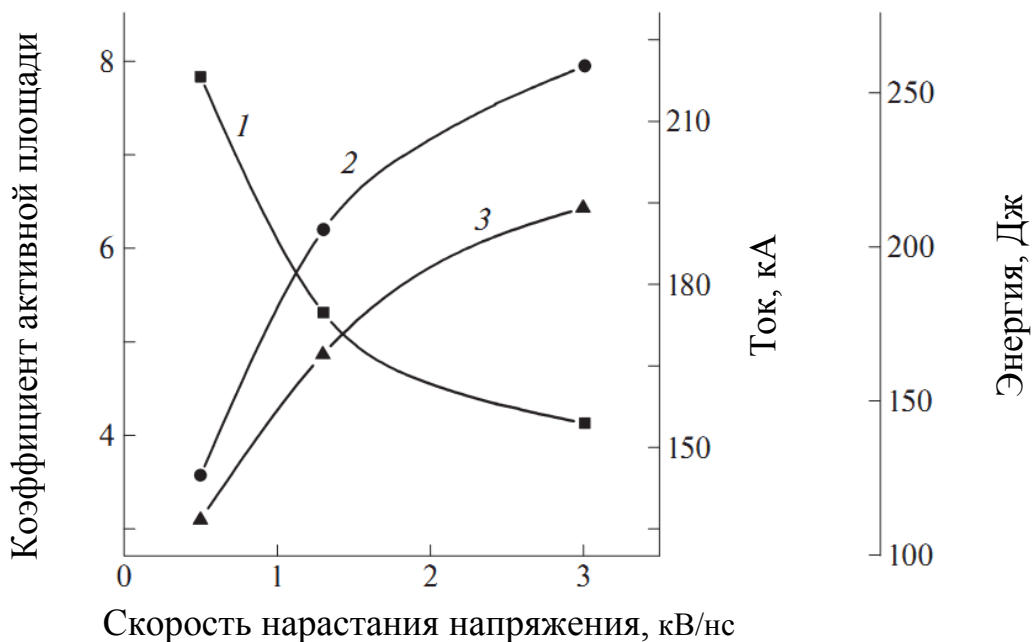


Рисунок 3.12 – Зависимости коэффициента активной площади структуры тиристора $K = S/S_a$ (1), амплитуды тока пробоя I_{br} (2) и энергии потерь в тиристоре W_T (3) от скорости нарастания напряжения на тиристоре

Очевидно, что для анализа и объяснения полученной зависимости требуется проведение дополнительных экспериментов, включающих накопление статистических данных по величине тока пробоя. Тем не менее, на наш взгляд, полученный экспериментальный материал позволяет провести обсуждение возможного механизма влияния величины dU/dt на ток пробоя тиристоров.

В [66] при исследовании д.г.у. наблюдалось снижение потерь энергии в динисторах при увеличении скорости нарастания напряжения на стадии запуска. Наблюдаемый эффект авторы связывали с увеличением электрического поля вблизи коллекторного перехода с ростом величины dU/dt , что приводило к увеличению интенсивности процессов ударной ионизации и наработке более плотной электронно-дырочной плазмы. При длительностях импульсов тока в десятки наносекунд [66] такое объяснение вполне оправдано.

В нашем случае начальная электронно-дырочная плазма с характерной для ударно-ионизационного механизма включения плотностью $\sim 10^{15}$ см⁻³ при скорости нарастания плотности тока ~ 2 кА/(см²·мкс) удаляется из структуры за

время менее 100 нс (начальные значения $dI/dt = 50-60$ кА/мкс, площадь тиристора – 24 см²). Очевидно, что такой механизм не может объяснить увеличение пропускной способности тиристора по току при характерных длительностях импульса более 20 мкс.

Визуальный осмотр пробитых полупроводниковых элементов (рисунок 3.13) показал наличие в местах пробоя расплавленного кремния на катодной поверхности элемента, что свидетельствует о тепловом механизме разрушения тиристором. В силовых кремниевых приборах при прохождении импульса тока высокой плотности и росте температуры структуры температурная зависимость напряжения изменяется с положительной на отрицательную при достижении критической температуры $T_{cr} \sim 500$ °С [15]. При этой температуре концентрация собственных носителей, образованных за счёт тепловой генерации, начинает превышать концентрацию инжектированных носителей, а ток через прибор переключается в более нагретые участки структуры, увеличивая их температуру до температуры плавления кремния.

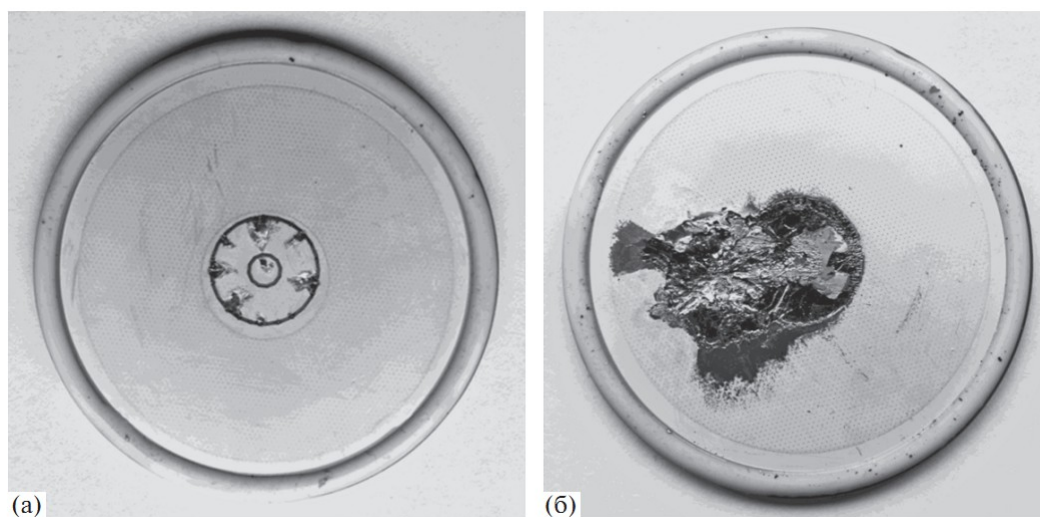


Рисунок 3.13 – Фотографии полупроводниковых элементов тиристором со стороны катодного электрода с характерными следами разрушений: а – пробой по кромке регенеративного электрода управления, б – разрушение элемента в режим одноканального пробоя. Ток пробоя I_{br} и энергия накопителя W_C : 260 кА и 15 кДж (а), 150 кА и 7 кДж (б)

На осциллограмме напряжения (кривая 1 на рисунке 3.11, участок А) наблюдается характерная область нарастания и спада, подобное наблюдалось и в работе [67]. В [68] такой всплеск напряжения на осциллограммах использовался авторами для установления предельной величины амплитуды импульса тока через реверсивно включаемые динисторы (РВД). В нашем случае при пробое тиристоров на осциллограммах также наблюдается участок увеличения и последующего спада напряжения и соответствующий ему второй пик на осциллограмме мощности потерь (рисунок 3.11).

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 .

Таблица 3.2 – Параметры коммутатора и разрядного контура при различных значениях скорости нарастания напряжения на тиристоре dU/dt .

Параметры	Скорость нарастания напряжения dU/dt , кВ/нс		
	0,5	1,3	3,0
U_m , кВ	4,1	5,3	6,5
I_{br} , кА	145	190	220
$(dI/dt)_m$, кА/мкс	44,6	57,0	61,0
W_C , кДж	8,0	10,6	12,2
W_T , Дж	112	165	212
ΔT , °С	60,9	89,7	115,2
$K = S/S_a$	7,8	5,3	4,1
$(1/K) \cdot 100$, %	12,8	18,9	24,4

Для трех значений dU/dt (рисунок 3.10) по осциллограммам тока и напряжения при пробое тиристоров были рассчитаны значения энергии W_T , выделившейся в структуре тиристора, и соответствующие значения приращения температуры ΔT в предположении, что выделение тепла происходит однородно по

всей площади структуры. Расчетные значения энергии W_T и ΔT приведены в таблице 3.2. Коэффициент K , равный отношению полной площади структуры S к площади ее активной части S_a , находится из соотношения 3.1:

$$\Delta T \cdot S = (T_{cr} - T_0) \cdot S_a \quad (3.1)$$

где $T_0 = 25^\circ\text{C}$ – начальная температура структуры. Полученные значения коэффициента K приведены в таблице 3.2 и графически представлены на рисунке 3.12 (кривая 1).

В настоящее время отсутствует установившаяся точка зрения о том, насколько процесс распространения ударно-ионизационного фронта однороден по площади структуры [69]. В случае распространения фронта по части площади структуры остается также открытым вопрос о количестве и поперечном размере локальных плазменных образований или каналов, по которым происходит переключение прибора и дальнейшее протекание тока.

При исследовании процесса переключения на основе ударно-ионизационного фронта в [57], [59] было показано, что совпадение расчетного и экспериментально наблюдаемого времени спада напряжения на приборе достигается в предположении, что коммутация тока происходит только по части площади структуры. В [41] проводилось визуальное наблюдение процесса ударно-ионизационного переключения арсенидгаллиевых диодных структур при различных скоростях нарастания обратного напряжения. Было установлено, что переключение происходит по отдельным токопроводящим каналам, а число каналов и, соответственно, активная площадь структуры увеличиваются с ростом dU/dt .

В [52] методами численного моделирования также было показано, что расчетные и экспериментально наблюдаемые времена спада напряжения на тиристорах, переключаемых в проводящее состояние волной ударной ионизации, имеют количественное согласие только в том случае, когда величина активной площади структуры, через которую проходит ток переключения, увеличивается с возрастанием dU/dt . 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 соответствующем 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.

Таким образом, экспериментальные результаты, полученные в ходе диссертационной работы, а также их интерпретация, основанная на предположении прохождения тока только по части площади структуры, в целом не противоречат выводам работ [41], [52], [57], [59].

На рисунке 3.13 приведены фотографии разрушенных полупроводниковых элементов. Отметим, что при небольших значениях тока пробоя ($I_{br} < 150$ кА) и выделившейся энергии в тиристоре ($W_T < 120$ Дж) выход из строя может и не сопровождаться появлением видимых участков оплавления катодной поверхности элемента. В этом случае тиристоры выходят из строя из-за резкого увеличения тока утечки (≥ 1 мА при напряжении < 2 кВ), что нарушает однородное распределение напряжения по тиристорам, а также не позволяет зарядить накопитель до исходного напряжения U_0 .

При увеличении I_{br} и W_T пробой всегда связан с образованием видимых мест оплавления. Характерные места пробоя возникают вблизи неоднородностей на катодной поверхности элемента, где происходит дополнительное увеличение плотности тока – вблизи кромки регенеративного электрода управления (рисунок 3.13, (а)). При этом пробой носит многоканальный характер: за один импульс образуется несколько (до 10) мест пробоев. В случае одноканального

включения тиристора (самопроизвольное срабатывание без приложения импульса запуска) характер разрушений изменяется существенно – образуется одна область разрушения, размеры которой могут достигать 20-25% от полной площади тиристора (рисунок 3.13, (б)).

Для оценки надежности работы коммутатора в безопасном режиме при токах ниже пробивного значения емкостный накопитель с суммарной емкостью модулей ~ 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 $dU/dt = 6$ кВ/нс (3 кВ/нс на один тиристор). Этому значению dU/dt соответствует кривая 3 на рисунке 3.9 и ток пробоя $I_{br} \sim 220$ кА. Осциллограммы импульсов тока и напряжения приведены на рисунке 3.14.

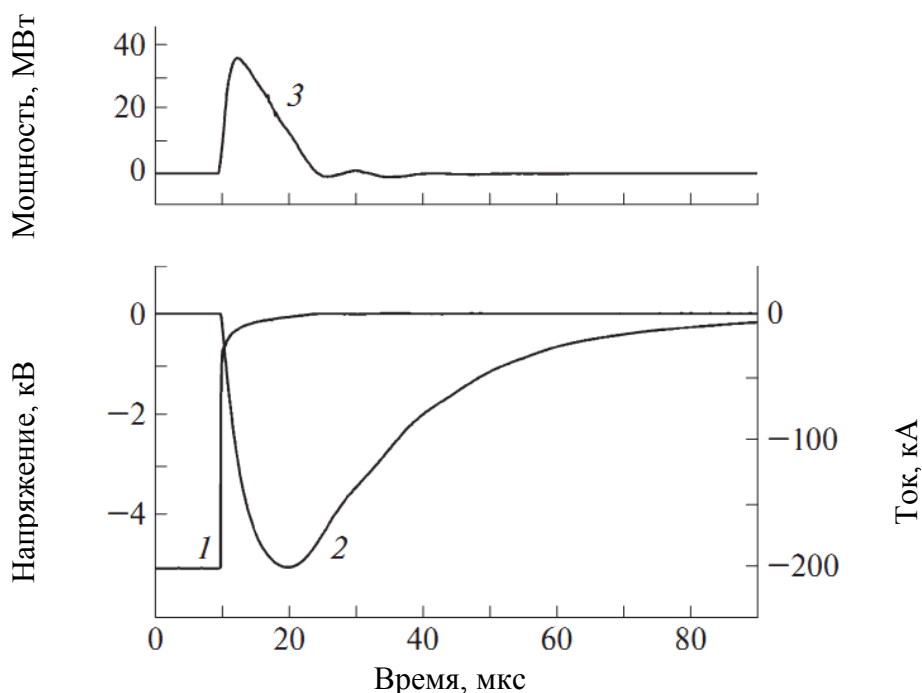


Рисунок 3.14 – Осциллограммы импульсов напряжения (1), тока (2) и мощности потерь (3) для тиристорного коммутатора в безопасном режиме работы.

Тиристоры T253-800-24 (2 последовательно), импульс запуска – кривая 3 на рисунке 3.10.

Параметры разрядного процесса: начальная скорость нарастания тока 58 кА/мкс, длительность импульса на полувывсоте 25 мкс, фронта – 5,5 мкс (уровень 0,1-0,9 от амплитуды), эффективность переключения $\eta = 1 - W_T/W_C = 0,97$. Всего было проведено 100 включений коммутатора. Через каждые 5 включений измерялся ток утечки через тиристоры. При прямом номинальном напряжении 2,4 кВ на один тиристор ток утечки составлял ~4 мкА и не изменялся в течение всего цикла испытаний.

Таким образом, в данной части работы показана возможность коммутации импульсов тока амплитудой до 200 кА со скоростью нарастания ~50 кА/мкс серийными тиристорами таблеточной конструкции при их запуске в режиме ударно-ионизационной волны. При энергии емкостного накопителя 12,5 кДж и длительности импульса тока 25 мкс эффективность переключения составила 0,97. Полученные параметры по амплитуде тока и скорости его нарастания близки к параметрам, реализуемым при использовании реверсивно включаемых динисторов [68], [70], [71].

3.3 Влияние dU/dt на процесс коммутации и стадию протекания тока

Результаты, описанные в предыдущем разделе, позволяют сделать вывод, что параметры запускающего импульса, в частности скорость нарастания напряжения dU/dt , существенно влияют на стадию запуска тиристора в режиме ударно-ионизационной волны. Это влияние проявляется в конечном итоге и во время стадии протекания тока. Так снижение скорости dU/dt импульса запуска приводит к снижению максимального тока, который может пропустить тиристор без разрушения. Таким образом, необходимо более детальное исследование влияния dU/dt на процесс коммутации тиристоров в режиме ударно-ионизационного фронта. Этому вопросу посвящён данный раздел.

В экспериментах с пропусканием разрядного тока через тиристор Т143-400-24 в работе [60] 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 ~1,9 мкс импульсом тока

амплитудой ~ 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. Подробное описание схемы эксперимента приведено в четвёртой главе.

Результаты экспериментов приведены в таблице 3.3, где dU/dt – скорость нарастания напряжения на стадии запуска, G_0 – проводимость на начальном этапе коммутации, G – проводимость в момент максимума тока, W_{TS} – потери энергии в тиристоре на стадии протекания тока, and η – эффективность коммутатора. После $\sim 10^5$ включений с частотой следования импульсов до 1 кГц, параметры 2-кВ коммутатора не изменились.

Таблица 3.3 – Влияние dU/dt на эффективность работы 2-кВ коммутатора

Параметры	Скорость нарастания напряжения dU/dt , кВ/нс							
	5,0	4,0	3,0	2,0	1,5	1,0	0,9	0,6*
G_0 , См	13,9	11,5	8,9	5,7	3,6	2,1	0,7	0,1
G , См	146	123	104	89	87	77	67	30
W_{TS} , Дж	0,34	0,38	0,44	0,50	0,54	0,65	0,74	1,48*
$\eta = 1 - W_T / W_{Cl}$	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,93	0,86*

* – пробой тиристора

Типичные осциллограммы тока и напряжения на тиристоре T143-400-24 при ударно-ионизационном механизме переключения представлены на рисунке 3.15. Приведены токи и напряжения для двух крайних значениях dU/dt при которых работал коммутатор: ~ 5 кВ/нс (кривые 1 и 4 на рисунке 3.15) и ~ 0.9 кВ/нс (кривые 2 и 3 на рисунке 3.15).

Для более наглядной иллюстрации полученных результатов некоторые данные из таблицы 3.3 удобно представить в виде графиков. На рисунке 3.16 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. Проводимость G рассчитана в момент максимального тока через тиристор, эту величину можно считать средним значением проводимости.

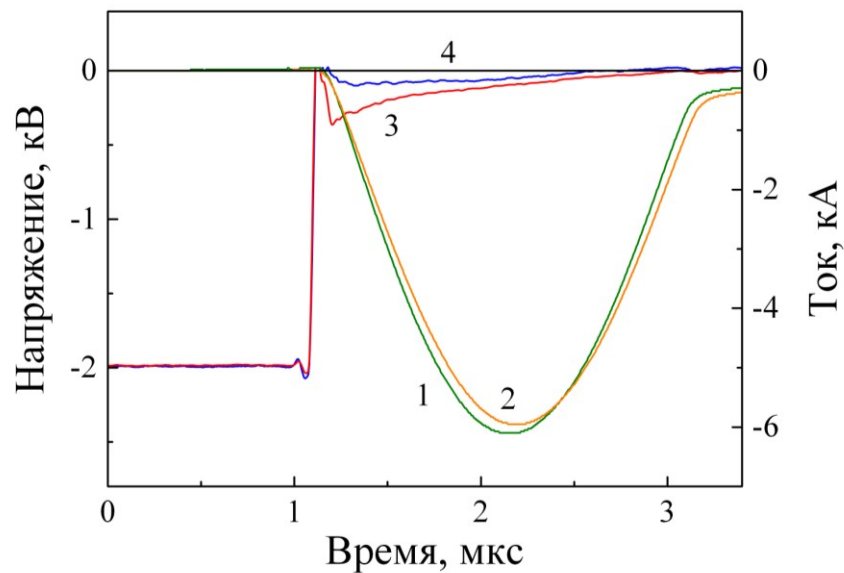


Рисунок 3.15 – Осциллограммы тока (кривые 1 и 2) протекающего через тиристор Т143-400-24 и напряжение на нём (кривые 3 и 4) при скорости нарастания напряжения $dU/dt \sim 5$ кВ/нс (кривые 1 и 4) и $\sim 0,9$ кВ/нс (кривые 2 и 3)

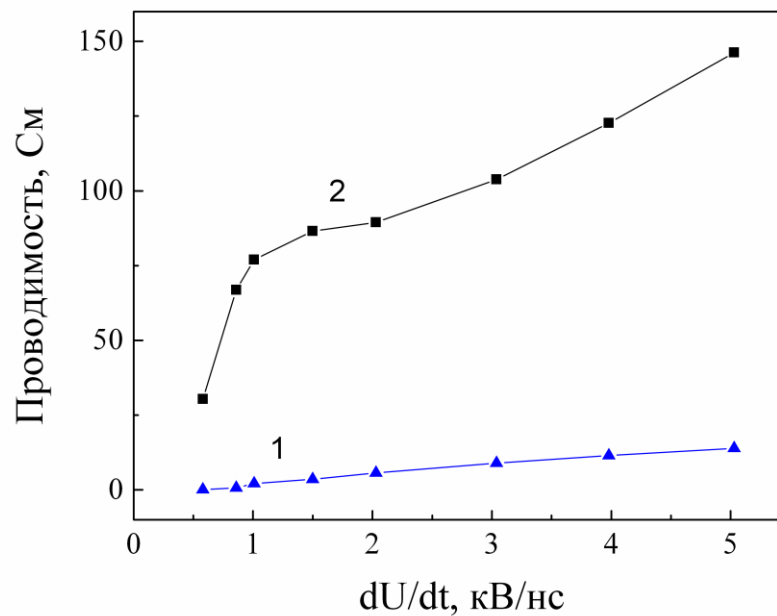


Рисунок 3.16 – Зависимость проводимости тиристора Т143-400-24 от скорости нарастания напряжения dU/dt : G_0 – проводимость в начальный момент времени (кривая 1), G – проводимость в момент максимума тока (кривая 2)

На рисунке 3.17 показана зависимость потерь энергии в тиристоре W_{TS} от скорости нарастания напряжения dU/dt . Треугольником обозначена точка $dU/dt = 0,6$ кВ/нс и $W_{TS} = 1,48$ Дж, в которой исследуемый тиристор вышел из строя. Видно, что потери энергии в тиристоре снижаются при увеличении dU/dt .

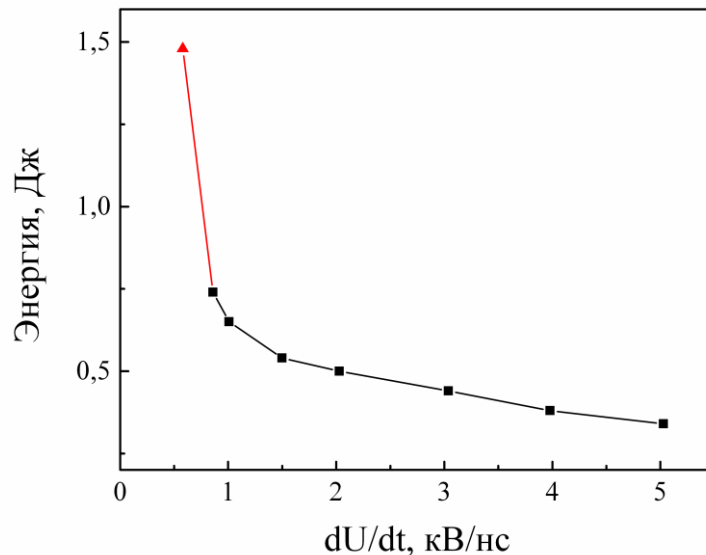


Рисунок 3.17 – Зависимость потерь энергии W_{TS} в тиристоре T143-400-24 от скорости нарастания напряжения dU/dt

Отдельного внимания заслуживает сравнение работы коммутатора при $dU/dt = 5,0$ и $0,9$ кВ/нс (рисунок 3.15). При близких значениях тока (кривые 1 и 2 на рисунке 3.15), амплитуда всплеска напряжения на тиристоре при $dU/dt = 0,9$ кВ/нс (кривая 3 на рисунке 3.15) в ~ 4 раза больше, чем при $dU/dt = 5,0$ кВ/нс. Начальная проводимость тиристора G_0 после его перехода в проводящее состояние увеличивается в ~ 20 раз при увеличении dU/dt с $0,9$ до 5 кВ/нс (таблица 3.3). Полученную зависимость снижения проводимости и увеличения падения напряжения на тиристоре при снижении скорости нарастания запускающего напряжения можно 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 . Это подтверждается возрастанием проводимости (рисунок 3.16) и снижением потерь энергии в тиристоре (рисунок 3.17) при увеличении скорости нарастания напряжения dU/dt .

Проблема однородного или филаментарного включения полупроводниковой структуры при возбуждении ударно ионизационной волны на сегодняшний день не имеет однозначной трактовки. Однако экспериментальные результаты, полученные в данном разделе, дают основание полагать, что пробой развивается по активной площади тиристора, которая в общем случае меньше полной площади. Увеличение скорости нарастания напряжения запускающего импульса приводит к увеличению активной площади тиристора и к снижению потерь при протекании силового тока. Очевидно, что вопрос пространственно неоднородного переключения полупроводниковых структур в проводящее состояние волной ударной ионизации требует проведения дополнительных исследований, как экспериментальных, так и теоретических.

Однако, с практической точки зрения, имеющиеся к настоящему времени данные, включая 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.

3.4 Выводы по третьей главе

В третьей главе диссертационной работы представлены результаты исследований тиристорных коммутаторов с запуском в режиме ударно-ионизационного фронта на стадии протекания силового тока. В разработанных коммутаторах использованы промышленные тиристоры таблеточной конструкции. Данные коммутаторы, благодаря запуску в режиме ударно-ионизационного фронта, обеспечивают время перехода в проводящее состояние порядка ~200 пс и способны коммутировать импульсы тока микросекундной и субмикросекундной длительности.

Первый коммутатор состоит из 9 последовательно соединённых тиристоров Т343-500-20 с диаметром кремниевой структуры 40 мм и обеспечивает блокируемое напряжение – 20 кВ, максимальную амплитуду тока – 45 кА и максимальную скорость нарастания тока di/dt – 134 кА/мкс. Длительность импульса коммутируемого тока на полувысоте составляет 1 мкс, энергия

емкостного накопителя – 400 Дж. Предельно допустимая скорость нарастания тока для данных тиристоров по паспорту равна 0,4 кА/мкс при инжекционном механизме запуска через управляющий электрод. Запуск тиристора в режиме ударно-ионизационного фронта позволил более чем в 300 раз увеличить максимальное значение dI/dt . Следует отметить, что в экспериментах скорость нарастания тока была ограничена конструкцией экспериментальной установки, а не коммутатором. Определение предельных значений dI/dt требует дальнейших исследований, однако уже сейчас очевидно, что тиристоры, запускаемые в режиме ударно-ионизационного фронта, обладают показателем максимальной скорости нарастания тока соизмеримым с наиболее быстрыми современными полупроводниковыми коммутаторами, такими как д.г.у. и интегральные тиристоры.

Второй коммутатор состоит из двух последовательно соединённых тиристоров Т253-800-24 с диаметром кремниевой структуры 56 мм и обеспечивает блокируемое напряжение – 5 кВ, максимальную амплитуду тока – 200 кА и максимальную скорость нарастания тока dI/dt – 58 кА/мкс. Длительность импульса коммутируемого тока на полувысоте составляет 25 мкс, энергия емкостного накопителя – более 10 кДж. Показано, что по совокупности рабочих параметров коммутатор на основе серийных тиристоров с запуском в режиме ударно-ионизационного фронта может быть сопоставим с РВД – одним из наиболее мощных современных полупроводниковых коммутаторов микросекундного диапазона.

Эффективность разработанных коммутаторов составила 0,85-0,97 в зависимости от длительности коммутируемого импульса тока. В ходе экспериментов было произведено порядка 10^2 - 10^3 включений тиристорных коммутаторов, при этом постоянно контролировалась амплитуда тока утечки на номинальном напряжении и сравнивалась со значением, измеренным для новых тиристоров. При работе коммутаторов в области безопасных параметров коммутации изменение токов утечки тиристоров не наблюдалось. Это даёт основания полагать, что при работе кремниевых тиристоров в режиме ударно-

ионизационного фронта деградация полупроводниковой структуры отсутствует. Конечно, количество импульсов порядка 10^3 не достаточно для корректной оценки ресурса полупроводникового прибора, и окончательные выводы о ресурсе работы тиристорных коммутаторов в различных режимах требуют более длительных исследований. Результаты ресурсных испытаний тиристоров с запуском в режиме ударно-ионизационного фронта представлены в четвёртой главе диссертационной работы.

На наш взгляд, одним из наиболее важных результатов третьей главы является экспериментальное подтверждение зависимости активной площади тиристора от скорости нарастания напряжения на нём при запуске в режиме ударно-ионизационного фронта. В экспериментах с кремниевыми тиристорами таблеточной конструкции 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 таком механизме запуска тиристоров 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 . Очевидно, что для более детального анализа и объяснения полученной зависимости требуется проведение дополнительных экспериментов и расчетов.

Исследовано влияние скорости нарастания запускающего напряжения dU/dt на характеристики тиристора Т143-400-24 с запуском в режиме ударно-ионизационного фронта. Показано, что с ростом dU/dt уменьшается время перехода в проводящее состояние, а также увеличивается проводимость и снижаются потери энергии в тиристорах на стадии протекания тока. Полученные экспериментальные данные подтверждают филаментарный характер включения полупроводниковой структуры при возбуждении в ней ударно-ионизационной волны. При этом активная часть площади тиристора увеличивается с ростом параметра dU/dt . Для более глубокого понимания влияния параметров импульса запуска требуются дополнительные эксперименты и численное моделирование.

ГЛАВА 4

ЧАСТОТНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ

В четвёртой главе рассматриваются вопросы практического применения тиристорных коммутаторов с ударно ионизационным механизмом переключения. Результаты исследований, описанные в главах 2 и 3, дают основания полагать, что тиристорные коммутаторы с ударно ионизационным запуском могут эффективно использоваться в мощных импульсных генераторах напряжения. Такие генераторы служат для решения различных научно-исследовательских и технологических задач. Разработчики стремятся повысить эффективность и ресурс работы генераторов, а также снизить стоимость их изготовления и эксплуатации. О том, как на эти параметры влияет использование тиристорных ударно-ионизационных коммутаторов, пойдёт речь в этой главе.

Для исследований была выбрана схема SOS-генератора, где ударно-ионизационный тиристорный коммутатор используется для коммутации первичного накопителя энергии. SOS-генераторы имеют полностью твердотельную систему коммутации, поэтому они обеспечивают высокую частоту следования импульсов, стабильность выходных параметров и большой срок службы. Для понимания условий работы и требований, предъявляемых к первичному коммутатору, стоит более подробно рассмотреть устройство и области применения SOS-генераторов.

Особенностью работы SOS-диодов является ограничение длительности протекания тока накачки через прибор из-за процессов рекомбинации носителей зарядов в полупроводниковой структуре. Это, во-первых, ограничивает максимальные параметры выходного импульса по энергии и мощности; во-вторых, требует введения в схему SOS-генератора дополнительного устройства – магнитного компрессора энергии импульса (МК) [72].

Типичная длительность импульса тока, при которой возможна эффективная работа SOS-диодов, лежит в диапазоне от десятков до сотен наносекунд, а время передачи энергии из первичного накопителя, коммутируемого ключами на основе транзисторов или тиристоров, при энергии импульса в единицы и десятки

джоулей, как правило, лежит в диапазоне единиц и десятков микросекунд. Таким образом, для работы SOS-генератора МК должен обеспечивать сжатие энергии по времени на $\sim 2-3$ порядка величины, что требует применения $\sim 3-6$ последовательных звеньев сжатия энергии. Каждое звено содержит коммутирующий элемент, как правило, это либо магнитный ключ, либо трансформатор, работающий в ключевом режиме. Использование предварительной многоступенчатой системы компрессии энергии приводит к снижению эффективности SOS-генератора в целом, 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 стоимость SOS-генератора.

Логичным решением проблемы является использование схемы SOS-генератора с одним магнитным элементом, которая изображена на рисунке 4.1. По-сути, в данной схеме МК содержит лишь одно звено компрессии, роль ключа в котором играет насыщающийся трансформатор РТ. Такая схема широко используется в генераторах с импульсным напряжением $\sim 5-50$ кВ и энергией импульса менее 1 Дж, где в качестве прерывателя тока применяются дрейфовые диоды с резким восстановлением, ДДРВ [73], [74] и [75].

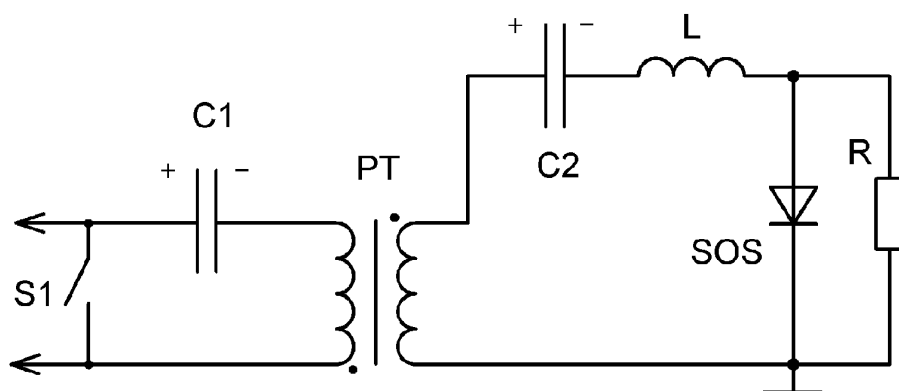


Рисунок 4.1 – Схема накачки SOS-диода с одним магнитным элементом.

Схема SOS-генератора с одним магнитным элементом (рисунок 4.1) работает следующим образом. Через транзисторный ключ S1 первичный накопитель C1 разряжается через трансформатор PT на высоковольтный конденсатор C2 за время 100-400 нс и производит накачку SOS прямым током. После насыщения сердечника трансформатора PT конденсатор C2 разряжается через SOS обратным током. К моменту максимума обратного тока электронно-дырочная плазма, созданная в SOS на стадии прямой накачки, выводится из структур, и далее наступает стадия обрыва тока и переключения его в нагрузку R.

Использование схемы с одним магнитным элементом при энергии импульса более 10 Дж ограничено возможностями первичного коммутатора S1 (рисунок 4.1). Так, например, при разряде конденсатора C1 с запасенной энергией 25 Дж при напряжении 10 кВ ($C1 = 0.5$ мкФ) за время 400 нс (время прямой накачки SOS) ключ S1 должен пропускать ток амплитудой 20 кА и скоростью нарастания $dI/dt \sim 150$ кА/мкс. В качестве ключа S1 могут применяться искровые разрядники или тиратроны [76], [77], однако в этом случае SOS-генератор лишается преимуществ полностью твердотельного подхода, таких как частота следования импульсов, ресурс, стабильность и др.

Таким образом, для реализации SOS-генератора с одним магнитным элементом необходим твердотельный коммутатор с рабочим напряжением ~ 10 кВ, амплитудой коммутируемого тока $\sim 1-10$ кА и скоростью нарастания тока ~ 100 кА/мкс. На сегодняшний день такие параметры могут обеспечить, например, интегральные тиристоры и динисторы с быстрой ионизацией (д.б.и.), описанные в первой главе диссертации.

Цель настоящей главы – экспериментально исследовать работу силовых промышленных тиристоров таблеточной конструкции в режиме ударно-ионизационного запуска в качестве первичного коммутатора в схеме SOS-генератора с одним магнитным элементом. Для этого необходимо было решить ряд задач. Исследовать процесс включения и определить время восстановления тиристоров при разном начальном напряжении. Исходя из времени восстановления, определить максимальную частоту работы для исследуемых

тиристоров. Провести частотные испытания, а также произвести оценку рабочего ресурса тиристоров. Исследовать влияние условий запуска тиристоров на потери энергии в них на стадии протекания тока. Показать связь активной площади тиристора со скоростью нарастания напряжения на стадии запуска. В итоге, изготовить и испытать SOS-генератор с одним магнитным элементом, где в качестве первичного коммутатора используется тиристорный ключ с ударно-ионизационным механизмом переключения. Результаты, описываемые в настоящей главе диссертации, опубликованы в работах [60], [64] и [60].

4.1 Схема экспериментальной установки и методика измерений

Для тиристорных коммутаторов с рабочим напряжением 2, 4 и 12 кВ, исследуемых в данной главе, принципиальная схема экспериментальной установки оставалась неизменной (рисунок 4.2). Исходя из этого, вначале приведены устройство и принцип работы экспериментальной установки в целом, затем более детально описаны особенности схем с различными коммутаторами.

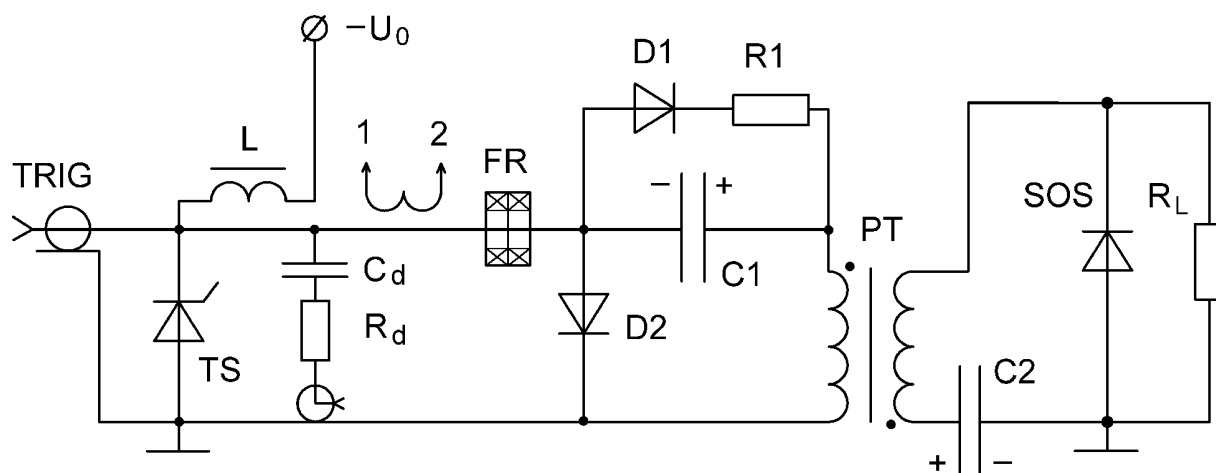


Рисунок 4.2 – Упрощённая схема экспериментальной установки: TS – исследуемый тиристорный коммутатор; L – зарядный дроссель; (C_d – R_d) – элементы делителя напряжения; (1–2) – пояс Роговского; FR – ферритовые кольца; C_1 – первичный емкостной накопитель энергии; (D_1 – R_1 , D_2) – защитные элементы; PT – импульсный трансформатор; C_2 – конденсатор накачки; SOS – полупроводниковый прерыватель тока; R_L – резистивная нагрузка

Упрощённая электрическая схема SOS-генератора показана на рисунке 4.2. Конденсатор C1 заряжается до начального напряжения отрицательной полярности U_0 от внешнего источника напряжения. Зарядка может происходить как постоянным током, так и в импульсном режиме. Зарядный дроссель L необходим, чтобы исключить влияние внешнего источника питания на процесс запуска тиристорного коммутатора. Аналогичную функцию выполняют ферритовые кольца FR, одетые на токоведущие шины. Они обеспечивают развязку тиристорного коммутатора от остальной части схемы. Исследуемый тиристорный коммутатор TS блокирует напряжение U_0 , которое является для него рабочим. После подачи импульса напряжения (также отрицательной полярности) в внешнего генератора запуска TRIG, коммутатор переходит в проводящее состояние за счёт возбуждения в полупроводниковой структуре ударно-ионизационной волны. При этом энергия из конденсатора C1 передаётся с помощью импульсного трансформатора PT в конденсатор накачки C2. При этом через SOS протекает ток в прямом направлении, то есть ток прямой накачки. После передачи энергии происходит насыщение сердечника трансформатора PT и конденсатор C2 начинает переворачиваться, то есть менять полярность. При этом протекает ток через SOS в обратном направлении – ток обратной накачки. В момент максимума тока, когда вся накопленная энергия сосредоточена в индуктивности вторичной обмотки трансформатора PT и паразитной индуктивности контура, происходит обрыв тока в SOS. В результате на резистивной нагрузке R_L формируется высоковольтный импульс наносекундной длительности.

Элементы D1, D2 и R1 служат для защиты тиристорного коммутатора. Так как часть энергии остаётся в первичном контуре, что приводит к изменению полярности на конденсаторе C1. Это, в свою очередь, вызывает протекание обратного тока через тиристорный коммутатор. При протекании обратного тока возможен его обрыв и бросок напряжения на тиристоре, который приведёт к необратимому пробое полупроводниковой структуры. Для того чтобы избежать этого, энергия, оставшаяся в первичном контуре, рассеивается в резисторе R1.

При открывании диода D1. Диод D2 исключает подачу положительного напряжения на катод тиристорного коммутатора.

Запуск TS осуществлялся подачей на силовые электроды тиристорного ключа (анод и катод) импульса напряжения отрицательной полярности. Источником импульса служил малогабаритный твердотельный генератор SM-3NS (TRIG на рисунке 4.2), описанный в предыдущих главах работы.

В исследуемом тиристорном коммутаторе TS используются низкочастотные Si тиристоры таблеточной конструкции марки T343-500-24 производства ЗАО "Протон-Электротекс". Основные характеристики тиристора: рабочее напряжение – 2,4 кВ (класс по напряжению – 24), напряжение стационарного пробоя ~ 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. Внешний вид тиристора T343-500-24 полностью идентичен тиристорам T343-500-20, показанному ранее на рисунке 2.1 (а). 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. Тиристоры в сборке стягивались с рекомендуемым осевым усилием сжатия 20 кН. Зарядное напряжение по тиристорам равномерно распределялось с помощью резисторов (не показаны на рисунке 4.2), а управляющие электроды тиристоров оставались разомкнутыми. Импульс запуска подавался на полную тиристорную сборку.

Первичный накопитель C1 был собран из пленочных конденсаторов марки К-75 и имел емкость от 0,2 до 6,0 мкФ с рабочим напряжением до 20 кВ, а в конденсаторе накачки C2 использовались как пленочные (К-75), так и керамические конденсаторы марки КВИ-3. В экспериментах емкость C2 изменялась в диапазоне 0,5–100 нФ, а напряжение на конденсаторе – от 10 до 200 кВ. Импульсный трансформатор РТ имел кольцевой сердечник из пермаллоя марки 50 НП из ленты толщиной 10 мкм. Размеры сердечника: наружный диаметр – 250 мм, внутренний диаметр – 140 мм, высота – 25 мм. Трансформатор

содержал один виток в первичной обмотке и, в зависимости от емкости и напряжения на конденсаторе C_2 , от 6 до 20 витков во вторичной обмотке. Трансформатор также имел 5-витковую обмотку подмагничивания с током до 5 А (не показана на рисунке 4.2), регулировка тока в которой позволяла изменять момент насыщения сердечника. В качестве прерывателя тока SOS использовались SOS-диоды с обрываемым током 2 кА и рабочим напряжением 120 кВ, соединяемые последовательно на напряжение до 360 кВ. В качестве нагрузки R_L служил набор из низкоиндуктивных угольных резисторов с керамическим корпусом марки ТВО.

Для изучения ударно-ионизационного процесса переключения тиристоров использовался делитель напряжения, состоящий из элементов C_d-R_d (рисунок 4.2). В ходе экспериментов было использовано два идентичных по схемотехнике делителя, которые отличались конструкцией и параметрами элементов C_d-R_d . Первый делитель служил для измерения напряжения на стадии коммутации (быстрый датчик, БД). Второй делитель использовался для измерения напряжения на стадии протекания тока (медленный датчик, МД). Низковольтное плечо для обоих делителей представляет собой 50-омный измерительный тракт. Собственное время нарастания сигнала на выходе БД, определенное в процессе калибровки, лежит в диапазоне $\sim 180-300$ пс по уровню 0,1–0,9 от амплитуды в зависимости от используемого разделительного конденсатора C_d . Длительность импульсов напряжения, измеряемых БД, не превышала 4 нс. Для определения собственного времени нарастания и калибровки БД использовался низковольтный лабораторный генератор напряжения на основе коаксиального кабеля с герконовым реле в качестве коммутатора. Фронт калибровочного импульса напряжения составлял 70 пс по уровню 0,1–0,9 от амплитуды.

Высоковольтное плечо R_d медленного датчика (рисунок 4.2) выполнено из низкоиндуктивного резистора марки ТВО с сопротивлением ~ 10 кОм. Разделительный конденсатор C_d изготовлен из сборки плёночных конденсаторов марки К-75, обладает ёмкостью $\sim 0,5$ мкФ и рабочим напряжением до 20 кВ.

Собственная переходная характеристика МД составляет ~ 25 нс, при этом длительность измеряемых сигналов лежит в диапазоне от 0,05 до 10 мкс.

Для измерения тока в первичном контуре, протекающего через исследуемый коммутатор TS, использовался пояс Роговского (1-2 на рисунке 4.2). Собственное время нарастания сигнала пояса составляет 60 нс. Для измерения напряжения на коммутаторе U_0 применялся дифференциальный пробник марки Tektronix P5210. Напряжение на конденсаторе C2 вычислялось исходя из значений ёмкости и заряда конденсатора. Заряд, в свою очередь, был получен путем интегрирования тока прерывателя SOS. Токи в нагрузке R_L и прерывателе SOS измерялись с помощью низкоиндуктивных резистивных шунтов с сопротивлением ~ 1 Ом и собственным временем нарастания не более 500 пс. Помимо этого система измерения включала широкополосный ослабитель сигнала производства Barth Electronics с полосой пропускания сигнала 18 ГГц и цифровой осциллограф реального времени Tektronix DPO 70404C с полосой пропускания 4 ГГц.

4.2 Тиристорные коммутаторы с рабочим напряжением 2 и 4 кВ

При разработке SOS-генератора, где в качестве первичного ключа используется тиристорный коммутатор с ударно-ионизационным механизмом переключения, прежде всего, необходимо исследовать работу первичного контура, в который входит непосредственно тиристорный коммутатор, первичный накопитель энергии, импульсный трансформатор, а также элементы защиты и измерительная система. Этому вопросу посвящён данный раздел. Элементы высоковольтной части генератора (трансформатор, конденсатор накачки, прерыватель тока и нагрузка) на данном этапе работы не оптимизировались и служили для отвода энергии из первичного контура.

В ходе экспериментов исследовано два типа тиристорных коммутаторов с ударно-ионизационным механизмом переключения. Первый имеет рабочее напряжение 2 кВ и коммутирует энергию 10,6 Дж; второй – 4 кВ и 16,0 Дж соответственно. Оба ключа выполнены на основе низкочастотных кремниевых тиристоров таблеточной конструкции. Исследовался как процесс переключения

коммутаторов, так и стадия протекания тока. Эксперименты с 4-кВ ключом имеют прикладную направленность, а результаты, полученные при исследовании 2-кВ ключа, позволяют лучше понять процессы фундаментального характера при возбуждении в полупроводнике волны ударной ионизации.

В экспериментах с 4-кВ ключом определено время восстановления коммутатора при различном начальном напряжении U_0 в диапазоне 1-4 кВ. В этом же диапазоне исследован процесс переключения. Исследован частотный режим работы коммутатора с частотой следования импульсов до 1 кГц. Проведена оценка рабочего ресурса тиристорного коммутатора в данном режиме. После наработки порядка 10^6 импульсов не было обнаружено деградации тиристоров. Другими словами, ток утечки тиристоров при номинальном напряжении оставался неизменным на протяжении всей серии экспериментов.

При исследовании 2-кВ ключа особое внимание было уделено зависимости потерь в тиристоре на стадии протекания тока от условий запуска, в частности от скорости нарастания напряжения dU/dt на тиристоре. Полученные экспериментальные данные дают основания полагать, что активная площадь тиристора, зависит от dU/dt . Под активной площадью понимается площадь полупроводниковой структуры, которая заполнена плазмой в результате ударно-ионизационных процессов на этапе включения и через которую протекает ток. Более подробно эксперименты с 2-кВ ключом описаны в разделе 3.3.

Коммутатор TS (схема изображена на рисунке 4.2) с рабочим напряжением 4 кВ состоял из двух соединённых последовательно таблеточных тиристоров Т343-500-24. Тиристоры были собраны в единую сборку и стянуты с рекомендуемым осевым усилием ~ 20 кН. Первичный накопитель С1 в данной серии экспериментов имел ёмкость равную 2 мкФ и при зарядном напряжении $U_0 = 4$ кВ запасал энергию $W_{C1} = 16$ Дж. Запускающий импульс напряжения прикладывался, как и ранее, к основным электродам коммутатора. Запуск осуществлялся внешним импульсным генератором, который обеспечивал скорость нарастания напряжения 10 кВ/нс на сборку тиристоров, соответственно на каждый тиристор – 5 кВ/нс. Увеличение dU/dt в 2 раза по сравнению с

режимом запуска одиночного тиристора обусловлено тем, что емкость ключа имеет в 2 раза меньшую емкость (два последовательно соединенных тиристора). При этом один и тот же заряд пускового импульса обеспечивает в 2 раза большее напряжение на 4-кВ ключе, а пусковое напряжение в расчете на один тиристор при этом практически не изменяется. При запуске тиристора, накопитель С1 разряжался на конденсатор С2 через импульсный трансформатор РТ за время $\sim 1,5$ мкс импульсом тока амплитудой ~ 8 кА и максимальной скоростью нарастания $dI/dt \sim 17$ кА/мкс.

Было исследовано влияние начального напряжения смещения U_0 для определения диапазона управляемой работы коммутатора. На рисунке 4.3 представлены осциллограммы напряжения, полученные с помощью БД, при изменении начального напряжения коммутатора U_0 от 1 до 4 кВ. Как видно из полученных осциллограмм, 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.

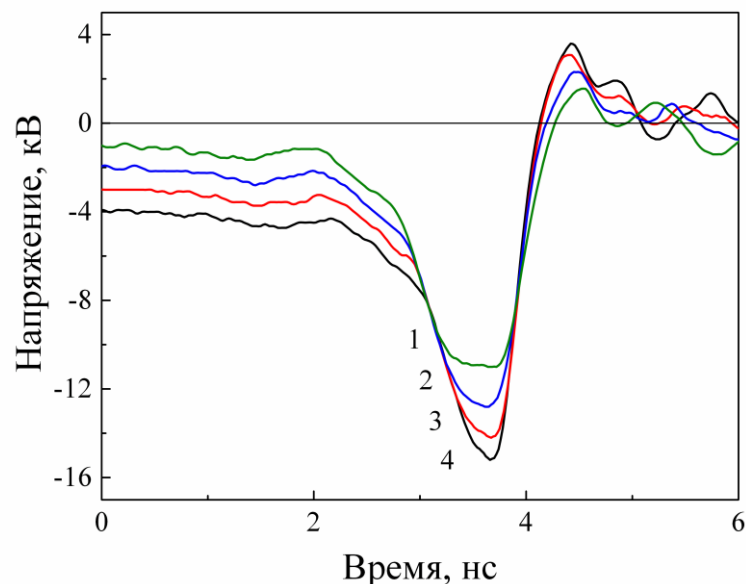


Рисунок 4.3 – Осциллограммы напряжения на 4-кВ тиристорном коммутаторе на стадии запуска при начальном напряжении $U_0 = 1-4$ кВ (кривые 1-4 соответственно)

Другим важным параметром для коммутатора, работающего в частотном режиме, является время восстановления. Это время, после которого коммутатор восстанавливает способность блокировать приложенное к нему номинальное напряжение. Таким образом, время восстановления коммутатора определяет максимальную частоту следования импульсов. Этот параметр имеет большую важность на практике, поскольку при прочих равных условиях определяет выходную среднюю мощность генератора в целом.

Для определения времени восстановления t_{rec} тиристорного коммутатора с рабочим напряжением 4 кВ также использовалась схема, изображённая на рисунке 4.2, с параметрами элементов описанными выше. В качестве источника зарядного напряжения использовался частотный преобразователь, который обеспечивал средний зарядный ток ~ 2 А и заряжал конденсатор $C1$ за время ~ 3 мс. Источник питания позволял программно задавать момент времени, когда начинался зарядный процесс. Благодаря этому регулировалась пауза до момента начала подачи напряжения на коммутатор после его срабатывания. При снижении этой паузы меньше пороговой величины $t_{rec} = 600$ мкс (рисунок 4.4) напряжение на тиристоре не увеличивается, что свидетельствует о протекании тока через тиристоры, значит, в этот момент времени, коммутатор находится в открытом состоянии.

Исследовалась зависимость времени восстановления коммутатора t_{rec} от начального напряжения U_0 в диапазоне 1-4 кВ. Как видно из полученных результатов, изображённых на рисунке 4.4, начальное напряжения смещения коммутатора не оказывает влияние на время восстановления тиристорного коммутатора $t_{rec} = 600$ мкс. Соответственно, максимальная частота работы 4-кВ коммутатора в данном режиме составляет $\sim 1,5$ кГц.

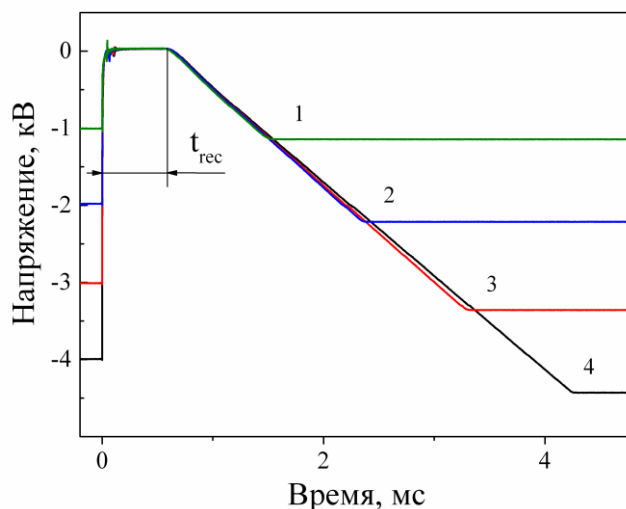


Рисунок 4.4 – Осциллограммы нарастания напряжения на 4-кВ тиристорном коммутаторе после коммутации при начальном напряжении $U_0 = 1-4$ кВ (кривые 1-4 соответственно) и зарядном токе ~ 2 А

В рамках данной работы были проведены ресурсные испытания тиристорного коммутатора с рабочим напряжением 4 кВ с ударно-ионизационным механизмом переключения. 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. Частота следования импульсов в непрерывном режиме работы была ограничена отводом тепла от элементов SOS-генератора и составляла 50 Гц. В режиме пачки импульсов максимальная частота работы 1 кГц была ограничена внешним источником питания, а длительность пачки 1 с была выбрана с учётом выделения тепла в тиристорном коммутаторе с воздушным охлаждением. 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. Под деградацией в данном случае понимается значительное увеличение тока утечки тиристоров при постоянном номинальном напряжении 2,4 кВ [37]. Ток утечки новых тиристоров T143-400-24 перед работой составлял 5 мкА. После пропуска нескольких импульсов тока с описанными выше параметрами ток утечки возрастал до ~ 10 мкА и далее оставался неизменным на протяжении всего времени ресурсных испытаний.

4.3 SOS-генератор с 12-кВ первичным тиристорным коммутатором, запускаемым волной ударной ионизации

Заключительным этапом работы стало создание SOS-генератора с тиристорным ударно-ионизационным коммутатором в первичном контуре. Принципиальная электрическая схема генератора приведена на рисунке 4.2. Это та же самая схема, что и в экспериментах с 2 и 4-кВ ключами, однако на данном этапе были оптимизированы обе части схемы: первичный контур (TS, C1, PT), и высоковольтная часть генератора (PT, C2, SOS, R_L), которая располагалась в металлическом баке, заполненном трансформаторным маслом.

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 ~16 Дж). Индуктивность контура передачи энергии из C1 в C2, определенная в опытах короткого замыкания нагрузки генератора, составила ~220 нГн, что при напряжении 12 кВ соответствовало начальной скорости нарастания тока в тиристорном ключе ~54 кА/мкс.

Тиристорный коммутатор представлял собой 6 последовательно соединённых таблеточных тиристоров марки T343-500-24. Тиристоры были зажаты с рекомендуемым производителем осевым усилием ~20 кН. Для равномерного распределения зарядного напряжения U_0 по тиристорам параллельно каждому тиристоры в сборке подключался резистор сопротивлением 10 кОм.

Система измерения напряжения на ключе состояла из БД с переходной характеристикой ~300 пс и МД с переходной характеристикой ~25 нс, описанных в начале главы. С помощью БД фиксировалось напряжение на ключе в момент коммутации, а МД измерялось падение напряжения на стадии протекания тока. Запуск коммутатора осуществлялся подачей импульса перенапряжения на всю сборку тиристоров от внешнего генератора, однако измерения с помощью БД проводились на одном тиристоре, анод которого был заземлён. Измеренная максимальная скорость нарастания запускающего напряжения dU/dt на одном

тиристоре лежала в диапазоне 2–3 кВ/нс. Измерение напряжения с помощью БД на всей тиристорной сборке было затруднено: во-первых, существенно ухудшалась переходная характеристика датчика из-за возрастания паразитной индуктивности подключения, а во-вторых, возрастало напряжение, прикладываемое к плёночному конденсатору, что могло привести к его пробое.

Работу 12-кВ ключа при передаче энергии из конденсатора С1 в высоковольтную часть схемы генератора иллюстрирует рисунок 4.5. Амплитуда импульса тока около 7,2 кА, начальная скорость нарастания тока ~ 54 кА/мкс (расчётная величина, так как пояс Роговского из-за относительно большого собственного времени нарастания сигнала сглаживает начальный участок нарастания тока), время передачи энергии до начала процесса насыщения сердечника трансформатора РТ составляет около 490 нс. Осциллограмма напряжения (кривая 1 на рисунке 4.5) обработана с вычетом индуктивной компоненты падения напряжения. Сопротивление ключа к моменту максимума разрядного тока падает до ~ 60 мОм, что составляет около 4% от волнового сопротивления контура передачи энергии. 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.

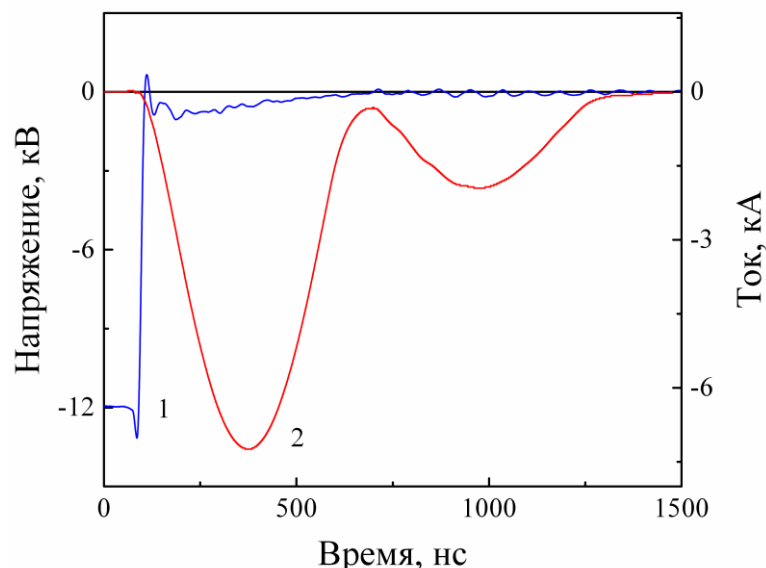


Рисунок 4.5 – Осциллограммы напряжения (кривая 1) и тока (кривая 2) для 12-кВ тиристорного коммутатора

Для исследования выходных параметров SOS-генератора была получена нагрузочная характеристика при изменении сопротивления нагрузочного резистора R_L в диапазоне от 50 до 500 Ω . Для нескольких значений резисторов из этого диапазона измерялась амплитуда напряжения, на основании чего вычислялись пиковая мощность. По форме импульса мощности была рассчитана энергия в нагрузке W_L , а также общая эффективность генератора без учёта вспомогательных систем $\eta_G = W_L / W_{CI}$. 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 полувысоте ~ 50 нс и энергия импульса – 10,2 Дж.

Осциллограммы тока через SOS и напряжения на $R_L = 215 \Omega$ (максимальная импульсная мощность генератора) приведены на рисунке 4.6. Длительность импульса тока прямой накачки SOS составляет ~ 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 ~ 15 нс. Максимальное напряжение на выходе генератора было получено при $R_L = 500 \Omega$ и составило ~ 300 кВ.

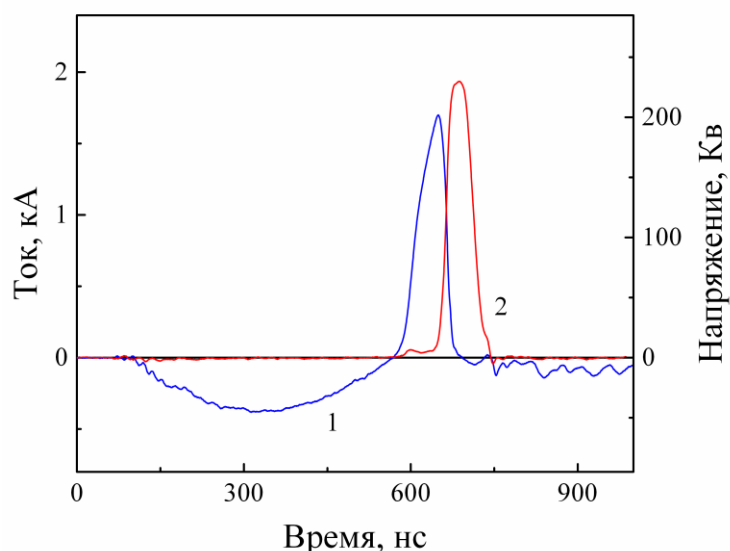


Рисунок 4.6 – Осциллограммы тока SOS (кривая 1) и напряжения на нагрузке $R_L = 215 \Omega$ (кривая 2)

Исследование эффективности тиристорного коммутатора и всего SOS генератора при изменении скорости нарастания запускаящего напряжения dU/dt проводилось так же, как и для 2-кВ ключа. SOS-генератор работал с оптимальной нагрузкой $R_L = 215 \Omega$. Полученные результаты представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Влияние dU/dt на эффективность работы 12-кВ коммутатора и SOS-генератора

Параметры	Скорость нарастания напряжения dU/dt , кВ/нс				
	2,5	1,7	1,3	1,1	0,9
W_{TS} , Дж	1,2	1,3	1,4	1,5	1,7
$\eta_{TS} = 1 - W_{TS} / W_{Cl}$	0,92	0,92	0,91	0,91	0,89
W_L , Дж	10,2	9,8	9,4	9,3	9,0
$\eta_G = W_L / W_{Cl}$	0,65	0,62	0,60	0,59	0,57

Так же как и для 2-кВ ключа, описанного в разделе 3.3, в коммутаторе с рабочим напряжением 12 кВ наблюдается зависимость потерь энергии при протекании тока от dU/dt на стадии запуска. Однако в данной серии экспериментов основное внимание уделялось эффективности работы SOS-генератора, а не фундаментальным процессам в тиристорном коммутаторе. При увеличении скорости нарастания напряжения на этапе запуска с 0,9 до 2,5 кВ/нс потери в тиристорном коммутаторе сокращались от 1,7 до 1,2 Дж. При запасённой энергии $W_{Cl} = 15,8$ Дж эффективность коммутатора возрастала от 0,89 до 0,92, а общая эффективность SOS-генератора – от 0,57 до 0,65.

Для SOS-генераторов с типичными значениями эффективности в диапазоне 0,2-0,4 при генерировании наносекундных импульсов с напряжением в сотни киловольт и пиковой мощностью более 200 МВт эффективность 0,65 является высоким показателем. Однако существует дополнительная схемотехническая возможность улучшить этот параметр. В исследуемом генераторе (рисунок 4.2) не используется схема рекуперации энергии. Часть от общей запасённой энергии W_{Cl} , в конечном итоге, остаётся в первичном контуре. В данной схеме эта энергия $\sim 1,3$ Дж рассеивается в пассивной цепи R1-D1. Если резистор R1 поменять на

импульсный трансформатор, возвращающий оставшуюся энергию в сеть, то эффективность работы SOS-генератора удастся повысить до 0,7.

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. На рисунке 4.7 показано напряжение на коммутаторе и процесс зарядки конденсатора С1. 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 С1 за время ~ 75 мкс. Внешний генератор подавал запускающий импульс на тиристорный коммутатор спустя 40 мкс после достижения номинального напряжения на нём. Выходная средняя мощность генератора на частоте 1 кГц составляла 8,5–9,0 кВт. При исследовании 12-кВ коммутатора (более 10^3 импульсов) признаков деградации тиристоров не выявлено.

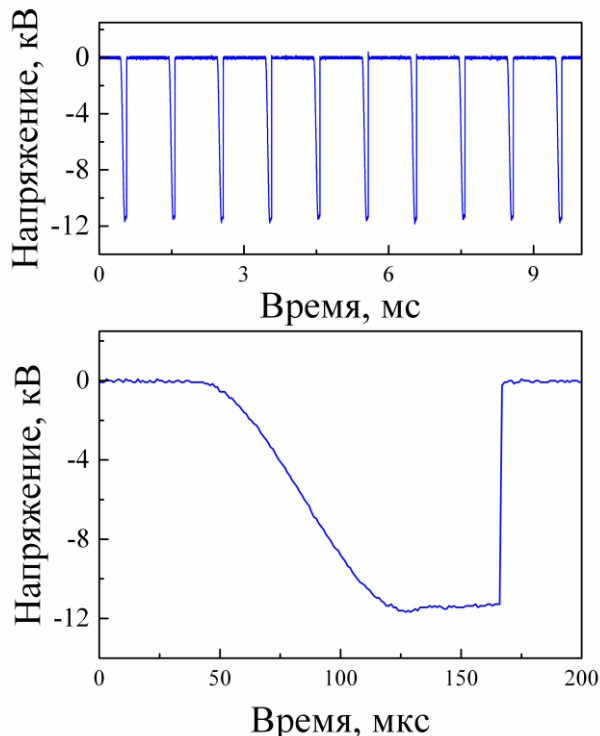


Рисунок 4.7 – Напряжение на 12-кВ коммутаторе в частотном режиме работы с частотой следования импульсов 1 кГц и длительностью пачки 1 с (вверху – пачка импульсов, внизу – одиночный импульс)

4.4 Выводы по четвертой главе

Рассмотрен вопрос практического применения ударно-ионизационных тиристорных коммутаторов в качестве первичного ключа в наносекундных генераторах с полупроводниковым прерывателем тока (SOS-генераторы). Коммутаторы содержат от 1 до 6 последовательно соединённых кремниевых низкочастотных тиристоров таблеточной конструкции с диаметром полупроводникового элемента 40 мм. При зарядном напряжении емкостного накопителя от 2 до 12 кВ и коммутируемой энергии от 10 до 16 Дж показана возможность работы коммутатора с разрядным током до 8 кА, скоростью нарастания тока di/dt до 54 кА/мкс и эффективностью переключения ~ 0.9 .

В экспериментах с 4-кВ ключом показано, что начальное напряжение, приложенное к коммутатору, слабо влияет на параметры коммутации и время восстановления тиристоров. Ключ с рабочим напряжением 4 кВ коммутировал импульс тока с амплитудой ~ 8 кА, длительностью $\sim 1,5$ мкс и $di/dt \sim 17$ кА/мкс. В этом режиме была проведена оценка времени восстановления коммутатора, которое составило ~ 600 мкс. Ресурсные испытания показали возможность длительной эксплуатации коммутатора с описанными выше параметрами. После 10^6 импульсов не было обнаружено изменений характеристик тиристоров.

Высокое быстродействие тиристоров с ударно-ионизационным механизмом запуска, по сравнению с традиционным способом управления, позволяет использовать их в качестве первичного коммутатора в схеме SOS-генератора с одним магнитным элементом. В такой схеме отсутствуют дополнительные магнитные звенья компрессии энергии, которые во многом определяют общие габариты, массу и потери энергии SOS-генераторов. Разработан тиристорный коммутатор с рабочим напряжением 12 кВ для использования в качестве первичного ключа в SOS-генераторе с одним магнитным элементом. 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. 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. В режиме пачки импульсов продемонстрирована работа генератора с частотой работы 1 кГц в режиме пачки импульсов. Габариты высоковольтной части разработанного генератора существенно меньше по сравнению с аналогичным по выходным характеристикам SOS-генератором, содержащим многоступенчатую систему компрессии энергии.

Эффективность разработанного SOS-генератора, рассчитанная как отношение энергии в нагрузке к энергии, запасённой в первичном накопителе, составила 0,65. Кроме того, предложен схемный вариант увеличения эффективности до 0,7 за счёт введения цепи рекуперации энергии.

Главным недостатком тиристорных коммутаторов с ударно-ионизационным механизмом переключения является необходимость использования достаточно мощного генератора запуска. Для эффективной работы коммутатора запускающий генератор должен обеспечивать скорость нарастания напряжения на каждом тиристоре около 2-3 кВ/нс. Для тиристоров с диаметром полупроводникового кристалла 40 мм амплитуда тока запускающего импульса составляет 1-2 кА, при этом напряжение на тиристоре за несколько наносекунд возрастает до значений, в 2-3 раза превышающих напряжение статического пробоя. В качестве источника импульса запуска могут применяться как уже готовые решения, например, генераторы фирмы FID Technology [12], так и устройства, разработанные на основе высоковольтных оптических коммутаторов [17], [18].

Тиристорные коммутаторы, описанные в данной работе, были исследованы в качестве первичного ключа мощного SOS-генератора, однако, полученные результаты имеют более широкое прикладное значение в области твердотельных импульсных генераторов больших импульсных токов. Кроме этого, важным преимуществом описанного подхода является широкая доступность и низкая стоимость таких тиристоров, поскольку они производятся в больших объемах и используются на электрических станциях, в электроприводе и электротранспорте, в тепловых, химических и электрохимических процессах на производстве и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении кратко перечислены полученные в диссертационной работе 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 полувывсоте имеет величину ~ 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 полувывсоте 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 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.

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 ~ 8 кА, длительностью $\sim 1,5$ мкс и $dI/dt \sim 17$ кА/мкс проведена оценка времени восстановления коммутатора, которое составило ~ 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 ~ 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 в режиме пачки импульсов. Эффективность разработанного SOS-генератора составляет 0,65 и может быть увеличена до 0,7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника / Г.А. Месяц. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
2. Bluhm H. Pulsed power systems: principles and applications / H. Bluhm – Berlin: Springer, 2006. – 327 p.
3. Грехов И.В. Силовая полупроводниковая электроника и импульсная техника / И.В. Грехов // Вестник российской академии наук. – 2008. – Т. 78, № 2. – С. 106 – 131.
4. Тучкевич В.М. Новые принципы коммутации больших мощностей полупроводниковыми приборами / В.М. Тучкевич, И.В. Грехов. – Л.: Наука, 1988. – 117 с.
5. Грехов И.В. Формирование субнаносекундных перепадов тока при задержке пробоя кремниевых рп-переходов / И.В. Грехов, А.Ф. Кардо-Сысоев // Письма в ЖТФ. – 1979. – Т. 5, № 15. – С. 950 – 953.
6. Tuchkevitch V. / V. Tuchkevitch, I. Grekhov // Bulletin of Academy of Sciences of USSR. – 1987. – № 4. – P.18.
7. New superfast power closing switched-dynistors on delayed ionization / V. Efanov [et al.] // 1996 International Power Modulator Symposium. – 1996. – Pp. 22–25.
8. Fast ionization dynistor (FID)-a new semiconductor superpower closing switch / V. M. Efanov [et al.] // 11th IEEE International Pulsed Power Conference. Digest of Technical Papers. – 1997. – Vol. 2. – Pp. 988–991.
9. Rodin P.B. Dynamic avalanche breakdown of a p-n junction: Deterministic triggering of a plane streamer front / P.B. Rodin, I.V. Grekhov // Applied Physics Letters. – 2005. – Vol. 86, № 24. – P. 243504.
10. Мощный полупроводниковый переключатель высоковольтных импульсов с наносекундным фронтом нарастания / Ю.В. Аристов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – № 2. – С. 87 – 90.

11. Grekhov I. Novel closing switches based on propagation of fast ionization fronts in semiconductors / I. Grekhov, S. Korotkov, P. Rodin // 16th IEEE International Pulsed Power Conference. – 2007. – Vol. 1. – Pp. 568 – 571.
12. Grekhov I.V. Pulse power generation in nano- and subnanosecond range by means of ionizing fronts in semiconductors: the state of the art and future prospects / I.V. Grekhov // IEEE transactions on plasma science. – 2010. – Vol. 38, № 5. – Pp. 1118 – 1123.
13. Динисторы с наносекундным быстродействием / С.В. Коротков [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2009. – № 5. – С. 90.
14. 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.
15. Евсеев Ю.А. Силовые полупроводниковые приборы: Учебник для техникумов / Ю.А. Евсеев, П.Г. Дерменжи. – М.: Энергоиздат, 1981. – 472 с.
16. Грехов И.В. Импульсная коммутация больших мощностей полупроводниковыми приборами / И.В. Грехов // Физика и техника мощных импульсных систем / Под ред. Е.П. Велихова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С. 237 – 253.
17. Overview of high voltage 4H-SiC photoconductive semiconductor switch efforts at Texas Tech University / D. Mauch [et al.] // 2014 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC). – 2014. – Pp. 23 – 26.
18. Photoconductive semiconductor switch experiments for pulsed power applications / F.J. Zutavern [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1990. – Vol. 37, № 12. – Pp. 2472 – 2477.
19. Schoenbach K.H. An optically controlled closing and opening semiconductor switch / K.H. Schoenbach // Journal of applied physics. – 1988. – Vol. 63, № 7. – Pp. 2460 – 2463.
20. Мощный наносекундный тиристорный переключатель, коммутируемый импульсом света / В.М. Волле [и др.] // Журнал технической физики. – 1981. – Т. 51, № 2. – С. 373 – 379.

21. Properties of high gain GaAs switches for pulsed power applications / F.J. Zutavern [et al.] // Digest of Technical Papers IEEE International Pulsed Power Conference. – 1997. – Vol. 2. – Pp. 959 – 964.
22. Benzel D.M. 1000-V, 300-ps pulse-generation circuit using silicon avalanche device / D.M. Benzel, M.D. Pocha // Review of Scientific Instruments. – 1985. – Vol. 56, № 7. – Pp. 1456 – 1458.
23. Vainshtein S.N. Analysis of the picosecond range transient in high-power switch based on bipolar GaAs transistor structure / S.N. Vainshtein, V.S. Yuferev, J.T. Kostamovaara // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2005. – Vol. 52, № 12. – Pp. 2760 – 2768.
24. High-power subnanosecond switch/ I.V. Grekhov [et al.] // Electronics Letters. – 1981. Vol. 17, № 12. – Pp. 422 – 423.
25. Superfast fronts of impact ionization in initially unbiased layered semiconductor structures/ P. Rodin [et al.] // Journal of applied physics. – 2002. – Vol. 92, № 4. – Pp. 1971 – 1980.
26. Rodin P. Field-enhanced ionization of deep-level centers as a triggering mechanism for superfast impact ionization fronts in Si structures / P. Rodin, A. Rodina, I. Grekhov // Journal of applied physics. – 2005. – Vol. 98, № 9. – P. 094506.
27. Process induced deep-level defects in high purity silicon / E.V. Astrova [et al.] // Semiconductor science and technology. – 1998. – Vol. 13, № 5. – P. 488.
28. Identification of process induced defects in silicon power devices / E.V. Astrova [et al.] // Solid State Phenomena. – 1999. – Vol. 69. – Pp. 539 – 544.
29. Abakumov V.N. Nonradiative recombination in semiconductors / V.N. Abakumov, V.I. Perel, I.N. Yassievich – Amsterdam: Elsevier, 1991. – 336 p.
30. Tunneling-assisted impact ionization fronts in semiconductors / P. Rodin [et al.] // Journal of applied physics. – 2002. – Vol. 92, № 2. – Pp. 958 – 964.
31. Сверхбыстрое переключение тока на основе туннельно-ударного ионизационного фронта полупроводниковым кремниевым коммутатором /

- С.К. Любутин, С.Н. Рукин, Б.Г. Словиковский, С.Н. Цыранов // Письма в Журнал технической физики. – 2005. – Т. 31, № 5. – С. 36 – 46.
32. Сверхмощная пикосекундная коммутация тока кремниевым обострителем с механизмом последовательного переключения структур / С.К. Любутин, С.Н. Рукин, Б.Г. Словиковский, С.Н. Цыранов // Физика и техника полупроводников. – 2010. – Т. 44, № 7. – С. 962 – 969.
33. Пикосекундное переключение тока высокой плотности (60 кА/см^2) кремниевым коммутатором на основе сверхбыстрого фронта ионизации / А.И. Гусев, С.К. Любутин, С.Н. Рукин, Б.Г. Словиковский, С.Н. Цыранов // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т. 48, № 8. – С. 1095 – 1106.
34. Rodin P. Impact ionization fronts in semiconductors: Superfast propagation due to nonlocalized preionization / P. Rodin, A. Minarsky, I. Grekhov // Applied Physics Letters. – 2008. – Vol. 93, № 1. – P. 013503.
35. Rodin P. Impact ionization fronts in Si diodes: Numerical evidence of superfast propagation due to nonlocalized preionization / P. Rodin, A. Minarsky, I. Grekhov // Journal of applied physics. – 2010. – Vol. 108, № 3. – P. 034501.
36. Мощный полупроводниковый переключатель высоковольтных импульсов с наносекундным фронтом нарастания / Ю.В. Аристов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – Т. 2. – С. 87 – 90.
37. Защита от деградации краевого контура в динисторах с быстрой ионизацией/ Ю.В. Аристов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2017. – Т. 2. – С. 57 – 60.
38. Protection against degradation of the edge contour in fast-ionization dynistors / Y.V. Aristov [et al.] // Instruments and Experimental Techniques. – 2017. – Vol. 60, № 2. – Pp. 210 – 212.
39. Формирование высоковольтных перепадов напряжения пикосекундного диапазона на арсенидгалиевых диодах/ Ж.И. Алферов [и др.] // Письма в Журнал технической физики. – 1987. – Т. 13, № 18. – С. 1089 – 1093.
40. Грехов И.В. О возможности генерации стимулированного излучения с помощью ударно-ионизационных волн в полупроводниках/ И.В. Грехов,

- В.М. Ефанов // Письма в Журнал технической физики. – 1990. – Т. 16, № 17. – С. 9 – 14.
41. Вайнштейн С.Н. Визуализация процесса субнаносекундного переключения арсенидгаллиевых диодных структур/ С.Н. Вайнштейн, Ю.В. Жилияев, М.Е. Левинштейн // Письма в Журнал технической физики. – 1988. – Т. 14, № 16. – С. 1526 – 1530.
42. Picosecond-Range Avalanche Switching of High-Voltage Diodes: Si Versus GaAs Structures / V.I. Brylevskiy et al. // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2016. – Vol. 44, № 10. – Pp. 1941 – 1946.
43. Investigation of properties of ultrafast switching in a bulk gallium arsenide avalanche semiconductor switch / L. Hu [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2014. – Vol. 115, № 9. – P. 094503.
44. The mechanism of superfast switching of avalanche S-diodes based on GaAs doped with Cr and Fe / I.A. Prudaev [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2018. – Vol. 65, № 8. – Pp. 3339 – 3344.
45. Полищук А. Полупроводниковые приборы на основе карбида кремния – настоящее и будущее силовой электроники / А. Полищук // Компоненты и технологии. – 2004. – № 43. – С. 8.
46. Rodin P. Performance evaluation of picosecond high-voltage power switches based on propagation of superfast impact ionization fronts in SiC structures / P. Rodin, P. Ivanov, I. Grekhov // Journal of applied physics. – 2006. – Vol. 99, № 4. – P. 044503.
47. Параметры карбид-кремниевых диодных обострителей импульсов пикосекундного диапазона / М.С. Иванов [и др.] // Письма в Журнал технической физики. – 2016. – Т. 42, № 1. – С. 87 – 94.
48. 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.

49. 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.
50. 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.
51. 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.
52. Исследование процесса спада напряжения при ударно-ионизационном переключении силовых тиристорov / А.И. Гусев, С.К. Любутин, С.Н. Рукин, С.Н. Цыранов // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т.51, № 5. – С. 680 – 688.
53. Протон-электротекс [Электронный ресурс] : [каталог]. – Режим доступа : <http://www.proton-electrotex.com/ru/product/tiristory-nizkochastotnye> . – (20.08.2018).
54. Гусев А.И. Высокочастотный SOS-генератор с выходным напряжением до 200 кВ / А.И. Гусев, А.В. Пономарёв // Восемнадцатая всероссийская научная конференция студентов физиков и молодых учёных (ВНКСФ). – 2012. – С. 261 – 262.
55. Compact high-frequency solid-state generator with subnanosecond voltage rise time / A.I. Gusev, A.V. Ponomarev, S.N. Rukin, B.G. Slovikovsky // Известия ВУЗов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 10/3. – С. 99 – 103.
56. Сканави Г.И. Физика диэлектриков (область сильных полей) / Г.И. Сканави. – М : Физматлит, 1958. – 907 с.
57. Родин П.Б. Численное моделирование пространственно неоднородного переключения кремниевых диодных обострителей / П.Б. Родин, А.М. Минарский, И.В. Грехов // Письма в Журнал технической физики. – 2012. – Т.38, № 11. – С. 78 – 87.

58. Kardo-Sysoev A.F. New Power Semiconductor Devices for Generation of Nano- and Subnanosecond Pulses / A.F. Kardo-Sysoev // *Ultrawideband Radar Technology* / Ed. by J.D. Taylor. – Boca Raton: CRC Press. – 2001. – Chapter 9. – Pp. 215 – 300.
59. Кардо-Сысоев А.Ф. Моделирование быстрых ионизационных волн при пробое в кремниевых р–n-переходах/ А.Ф. Кардо-Сысоев, М.В. Попова // *Физика и техника полупроводников*. – 1996. – Т. 30, № 5. – С. 803.
60. 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.
61. 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.
62. 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.
63. 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.
64. 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.
65. 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.

66. Исследование динисторных коммутаторов с наносекундным временем переключения / С.В. Коротков [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 4. – С. 67 – 72
67. Исследование высоковольтных интегральных импульсных тиристоров в моноимпульсном и пакетно-импульсном режимах / И.В. Грехов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2016. – № 3. – С. 32 – 36.
68. Мощные полупроводниковые ключи для импульсных применений / В. Мартыненко [и др.] // Компоненты и Технологии. – 2008. – № 10, С. 80 – 82.
69. Levinshtein M. Breakdown phenomena in semiconductors and semiconductor devices. / M. Levinshtein, J. Kostamovaara, S. Vainshtein. – Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2005. – 208 p.
70. Korotkov S.V. Switching possibilities of reverse switched-on dynistors and principles of RSD circuitry / S.V. Korotkov // Instruments and Experimental Techniques. – 2002. – Vol. 45, № 4. – Pp. 437 – 470.
71. Мощные коммутаторы на основе реверсивно включаемых динисторов для высоковольтных импульсных технологий / С.В. Коротков [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 3. – С. 58 – 63.
72. Megavolt repetitive SOS-based generator / S.N. Rukin [et al.] // IEEE Pulsed Power Plasma Science (PPPS-2001). Digest of Technical Papers. – 2001. – Vol. 2. – Pp. 1272 – 1275.
73. Power drift step recovery diodes (DSRD) / I.V. Grekhov [et al.] // Solid-State Electronics. – 1985. – Vol. 28, № 6. – Pp. 597 – 599.
74. Grekhov I.V. Physical basis for high-power semiconductor nanosecond opening switches / I.V. Grekhov, G.A. Mesyats // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2000. – Vol.28, № 5. – Pp. 1540 – 1544.
75. Pulse Power Nanosecond-Range DSRD-Based Generators for Electric Discharge Technologies / A.G. Lyublinsky [et al.] // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – Vol. 41, № 10. Pp. 2625 – 2629.

76. Соковнин С.Ю. Ускоритель УРТ-1М для радиационных технологий / С.Ю. Соковнин, М.Е. Балезин, С.В. Щербинин // Приборы и техника эксперимента. – 2013. – № 4. – С. 47 – 50.
77. Semiconductor opening switch operation at microsecond forward pumping time / S.N Rukin [et al.] // In 15th International Symposium on High Current Electronics (ISHCE). – 2008. – Pp. 284 – 287.