

Отечественные высоковольтные мощные фототиристоры с интегрированной самозащитой от пробоя

КОНЮХОВ А.В., ВЕСЕЛОВА И.М., МАРТЫНЕНКО В.А.,
ХАПУГИН А.А., ГРИШАНИН А.В.

*Представлены результаты прикладных исследований по разработке и применению высоковольтных мощных тиристоров с прямым управлением светом (ЛТТ) с интегрированными в кремниевую *pnpn*-структуру элементами самозащиты от пробоя в несанкционированных (критических) режимах эксплуатации.*

Ключевые слова: фототиристор, высокие напряжения, пробой, разрушение, самозащита

Развитие компонентной базы силовой электроники в настоящее время направлено на увеличение преобразуемой мощности единичных приборов, расширение номенклатуры и функциональных возможностей, повышение качества и надежности приборов и изделий на их основе. Анализ тенденций развития силовых полупроводниковых приборов показывает, что использование тиристоров, управляемых светом (фототиристоров), позволяет принимать простые и надежные схемотехнические решения в самых разнообразных областях применения: сложных проектах, связанных с передачей электрической энергии, устройствах с импульсной коммутацией сверхбольших мощностей, высоковольтном электроприводе и т.д.

Интерес к проблемам совершенствования параметров фототиристоров резко возрос в 70–80-х гг. XX в., когда после освоения промышленного производства нейтронно-легированного кремния с высокой степенью однородности удельного сопротивления открылись перспективы создания мощных полупроводниковых приборов с повышенными значениями тока и напряжения. Интенсивные исследования в области конструирования, совершенствования и оптимизации параметров высоковольтных мощных фототиристоров, начиная с 80-х гг. XX в., проводили ведущие иностранные фирмы и компании – General Electric Corporation, Westinghouse (США), Marconi (Великобритания), Siemens (Германия), Fuji, Hitachi, Mitsubishi (Япония). В промышленном производстве высоковольтных мощных фототиристоров ведущее место занимает фирма Infineon AG (EUPEC GmbH) (Германия), выпускающая приборы на токи 550–3480 А, напряжение переключения 5200–7500 В [1].

В России начало исследований по оптическому управлению приборами на основе *pnpn*-структур

*Results obtained from applied research works on development and use of high-voltage power light triggered thyristors with elements for self-protection from breakdown in off-design (critical) modes of operation built into the *pnpn*-structure are presented.*

Key words: photothyristor, high voltages, breakdown, destruction, self-protection

относится к тому же периоду, что и за рубежом (60-е гг. XX в.). Однако в дальнейшем работы по повышению мощности и динамических параметров тиристоров с оптическим управлением проводились эпизодически и практически не выходили за рамки научных исследований. По этой причине в номенклатуре отечественных силовых приборов тиристоры с оптическим управлением до последнего времени были представлены в узком диапазоне дискретных фототиристоров, оптронных тиристоров и модулей на относительно малые токи и напряжения. Разработка приборов с элементами защиты от пробоя при переключении по аноду вследствие перенапряжения, интегрированными в кремниевую *pnpn*-структуру, стала основной тенденцией в области совершенствования параметров фототиристоров и тиристоров в последние 15–20 лет. Необходимость создания нового поколения самозащищающихся (интеллектуальных) приборов продиктована возрастающей сложностью и стоимостью мощных и супермощных приборов и устройств на их основе. Функция встроенной защиты от пробоя состоит в том, чтобы при коммутации в несанкционированном (критическом) режиме исключить неконтролируемые и необратимые (деградационные) процессы в кремниевой структуре выпрямительного элемента прибора.

В статье представлен обзор совместных достижений ФГУП ВЭИ и ОАО «Электровыпрямитель» по разработке, исследованию и освоению в промышленном производстве серии высоковольтных мощных фототиристоров.

Фототиристоры для электроэнергетики. Фототиристоры широко применяются в современных энергосберегающих преобразователях для линий дальней передачи электроэнергии и вставок постоянного тока. Это обусловлено достоинствами фо-

фототиристоров при использовании в схемах с последовательным соединением приборов: высокая нагрузочная и перегрузочная способность, точный временной контроль включения группы приборов, высоковольтная гальваническая развязка между цепью управления и силовой цепью, высокая помехозащищенность, встроенные функции самозащиты от пробоя и др.

Конструкция фототиристоров аналогична конструкции высоковольтного таблеточного тиристора, только вместо электрического управляющего вывода имеется оптический вход. Система ввода светового сигнала в корпус прибора расположена в центре катодного основания фототиристора в виде оптического окна, находящегося вблизи фоточувствительной области полупроводниковой структуры (рис. 1).



Рис. 1. Конструкция фототиристора

Управляющий импульс передается в светочувствительную область кремниевой структуры фототиристора по оптоволоконному световоду. Последний соединяется оптическими разъемами с корпусом фототиристора и излучающим лазерным диодом. Длина световода практически не ограничена, так как затухание сигнала управления в нем очень мало (примерно 1 дБ на 1 км). Лазерный диод преобразует электрический сигнал от драйвера управления в световой импульс, форма и длительность которого практически как и у электрического. Фототиристор управляется световым импульсом ИК диапазона. Правильный выбор длины волны излучателя очень важен для эффективной работы фототиристора и обусловлен особенностью конструкции фототиристора с большой глубиной залегания коллекторного *pn*-перехода. На рис. 2 приведена расчетная зависимость времени задержки включения фототиристора от длины волны лазерного диода (импульсная мощность 200 мВт, анодное напряжение 100 В).

Из анализа результатов расчетов следует, что оптимум длины волны излучателя для управления разработанными фототиристорами находится в

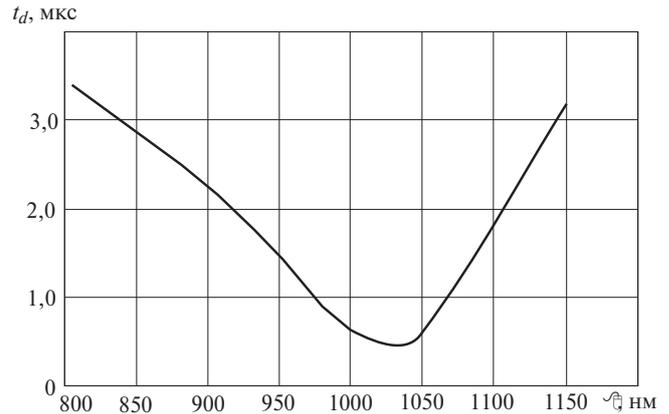


Рис. 2. Расчетная зависимость времени задержки включения фототиристора от длины волны лазерного диода ($P_{LM} = 200$ мВт, $U_A = 100$ В)

диапазоне 1,0–1,05 мкм. Свет с длиной волны более 1,1 мкм при $T = 300$ К неэффективен, так как энергия фотонов недостаточна для генерации электронно-дырочных пар. Также падает эффективность светового излучения, когда длина волны света становится меньше 1 мкм, так как с уменьшением длины электромагнитной волны сокращается глубина ее проникновения, и, как следствие, неравновесные электронно-дырочные пары рекомбинируют вблизи поверхности.

Важной проблемой при разработке фототиристоров является создание области управления фототиристора с высокой световой чувствительностью, так как, несмотря на усовершенствование источников света и световодов, мощность на выходе оптической системы намного меньше мощности, затрачиваемой на управление тиристорами электрическим током. Но при высокой чувствительности к сигналу управления тиристор одновременно чувствителен и к шумам, обладает малой стойкостью к скорости нарастания напряжения в закрытом состоянии (du_D / dt). Для обеспечения большого значения этой скорости площадь светочувствительной области должна быть небольшой, что, в свою очередь, приводит к ограничению первоначальной площади включения и значения скорости нарастания тока в открытом состоянии (di_T / dt).

Разработанные тиристоры управляются оптической мощностью не более 20 мВт и выдерживают $du_D / dt = 5000$ В/мкс. Это требование было выполнено за счет выбора оптимального диффузионного профиля полупроводниковой структуры фототиристора, топологии фоточувствительной и катодной областей, элементов усиления фототока – регенеративных каскадов управляющего электрода. Каскады вспомогательных тиристоров необходимы для усиления слабого тока управления, возникающего из-за световой генерации носителей заряда при об-

лучении квантами света светочувствительной области.

Опыт эксплуатации современных мощных тиристоров и других силовых полупроводниковых приборов позволил определить ряд специфических режимов с повышенным риском их выхода из строя. Одним из наиболее распространенных критических режимов при эксплуатации тиристоров является перенапряжение. В этом случае приложенное анодное напряжение превышает напряжение лавинного пробоя коллекторного pn -перехода, что приводит к переключению прибора. Процесс переключения, как правило, происходит в ограниченном участке площади $pnpn$ -структуры с минимальной электрической прочностью и завершается деградацией выпрямительного элемента из-за шунтирования тока и проплавления кремниевой структуры.

Задача интегрированной защиты от пробоя вследствие перенапряжения состоит в том, чтобы сформировать внутренний сигнал управления и включить тиристор в контролируемой области, прежде чем анодное напряжение на нем увеличится до напряжения переключения основной структуры. Для решения этой задачи в центральной области кремниевой структуры прибора создается локальный участок с пониженным по отношению к остальным областям значением напряжения лавинного пробоя коллекторного (среднего) pn -перехода. При превышении прямого напряжения уровня лавинообразования на тиристоре в локальном участке возникает ток лавинного пробоя, протекание которого к катоду вызывает включение тиристорной структуры. Указанный ток является, таким образом, внутренним сигналом управления тиристора.

Локальный участок с пониженным значением напряжения лавинного пробоя может находиться как в пределах фоточувствительной области управления фототиристора, так и за ее пределами. Кроме того, если структура имеет многокаскадное (многоступенчатое) регенеративное управление, этот участок, в принципе, может быть расположен в пределах любой из областей управления. Для создания локальных участков с пониженным значением напряжения лавинного пробоя была разработана технология локального уменьшения удельного сопротивления кремния в n -базе введением в кремниевую структуру фототиристора мелких донорных центров, связанных с атомами водорода.

Работа встроенных элементов самозащиты фототиристоров проверялась в тестовой схеме, которая формирует импульсы напряжения амплитудой до 10 кВ. Испытательная установка оснащена телевизионной системой, позволяющей с высокой

чувствительностью регистрировать ИК и видеоизображения областей локального пробоя в кремниевых структурах. Рис. 3 иллюстрирует процесс самозащиты фототиристора [2].

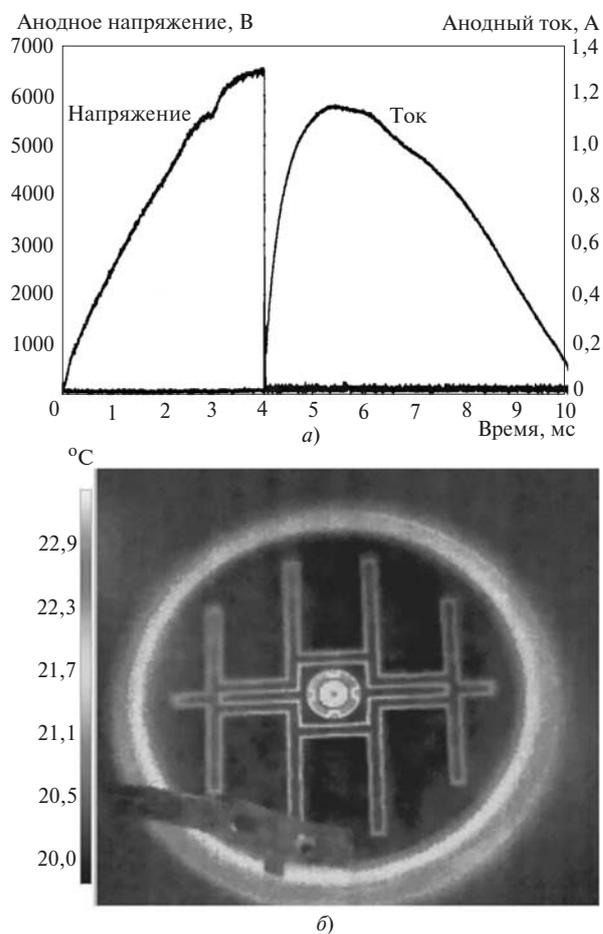


Рис. 3. Процесс самозащиты фототиристора

На рис. 3,а представлены осциллограммы напряжения и тока: подача импульса напряжения прямой полярности, переключение фототиристора при $U_D = 6500$ В, последующее протекание анодного тока через прибор. На рис. 3,б показано ИК изображение испытываемого прибора в момент срабатывания самозащиты, где четко видно место расположения локального участка с пониженным напряжением лавинного пробоя (так называемая «горячая» точка) в центре полупроводникового элемента фототиристора.

Компоненты, рассчитанные на последовательное и параллельное соединение и коммутацию больших мощностей, должны проектироваться так, чтобы процессы переключения в каждом ключе проходили одинаково. Для этого необходимо выполнение условия равных зарядов обратного восстановления. Технологический разброс значений заряда обратного восстановления минимизируется с помощью слабого электронного облучения кремниевых структур фототиристоров, что позволяет

снизить коммутационные перенапряжения с сохранением оптимального значения импульсного напряжения в открытом состоянии (U_{TM}).

Основные параметры и характеристики разработанных фототиристоров приведены в таблице.

Фототиристор для применения в импульсных режимах. Для схем современной силовой импульсной техники необходимы надежные в эксплуатации ключи для коммутации больших мощностей в микросекундном и субмиллисекундном диапазонах длительности импульсов тока. Твердотельные полупроводниковые ключи весьма привлекательны для построения импульсных систем питания, что связано прежде всего с высокой надежностью таких приборов, большим сроком службы, низкими эксплуатационными затратами, экологической безопасностью. Поэтому такие ключи применяются в аппаратуре для создания сверхмощных электромагнитных полей, питания мощных лазеров, в быстродействующих короткозамыкателях, системах энергоснабжения, радиолокационной технике, оборудовании для очистки воды, газов и в других схемах импульсной энергетики.

Особенность работы тиристорных ключей в импульсных режимах работы связана с коммутацией одиночных или редко повторяющихся мощных импульсов тока с амплитудой, близкой к максимально допустимым значениям ударных токов. Это приводит к выделению большого объема тепла в полупроводниковой структуре тиристора, что ограничивает коммутирующую способность прибора.

На рис. 4 представлена топология разработанного кремниевого элемента фототиристора для

работы в импульсных режимах, диаметр выпрямительного элемента мощного быстродействующего тиристора, управляемого светом, составляет 100 мм, прибор коммутирует ток амплитудой 100 кА при длительности импульса 700 мкс. Характерной особенностью топологии фототиристора является высокая степень разветвления управляющего электрода и наличие четырех ступеней регенерации. Разветвление управляющего электрода позволяет сократить время распространения включенного состояния и снизить коммутационные потери при включении.



Рис. 4. Топология полупроводникового элемента фототиристора для импульсных применений

Работоспособность и надежность тиристоров в импульсных режимах при коммутации импульсов тока с высокими di_T / dt сильно зависят от динамического распределения температуры по объему полупроводниковой структуры фототиристора. Вы-

| Наименование параметра | Значения параметров для фототиристоров | | | |
|---|--|------------|------------|------------|
| | ТФ353-630 | ТФ273-1000 | ТФ183-2000 | ТФ193-2500 |
| Напряжение переключения, U_{BO} , В | 6200–6600 | 6200–6600 | 6200–6600 | 7000–7800 |
| Повторяющееся импульсное обратное напряжение, U_{RRM} , В | 6600–7000 | 6600–7000 | 6600–7000 | 7200–8000 |
| Максимально допустимый средний ток в открытом состоянии при температуре корпуса $T_c = 70$ °С $I_{T(AV)}$, А | 790 | 1360 | 2115 | 2520 |
| Ударный ток в открытом состоянии I_{TSM} , кА | 12 | 24 | 40 | 55 |
| Критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии $(di_T / dt)_{cr}$, А/мкс | 300 | | | |
| Критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии $(di_D / dt)_{cr}$, В/мкс | 2000 | | | |
| Оптическая мощность управления P_{LM} , мВт | 40 | | | |
| Температура перехода T_j , °С | -40..+120 | | | |
| Время задержки включения t_d , мкс (не более) | 5,0 | | | |
| Время выключения (типичное значение) t_q , мкс | 630 | | | |
| Заряд обратного восстановления Q_{rr} , мкКл | 3000 | 4000 | 5000 | 6000 |
| Тепловое сопротивление переход - корпус R_{thjc} , °С/Вт | 0,0200 | 0,0112 | 0,0078 | 0,0067 |
| Масса m , кг | 0,65 | 1,5 | 2,0 | 3,0 |
| Усилие сжатия F , кН | 20–26 | 40–48 | 60–80 | 70–90 |

сокие плотности тока на начальном этапе включения приводят к перегреву тиристора в областях вспомогательных тиристоров и по границе катода, прилегающей к управляющему электроду. С целью определения критических областей, подверженных локальному перегреву, был выполнен расчет распределения температуры в центральной части структуры фототиристора. На рис. 5 приведены результаты расчета.

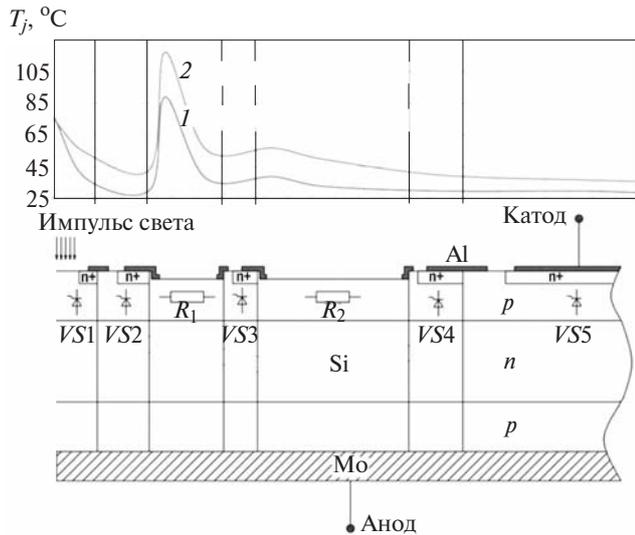


Рис. 5. Расчетная модель центральной части кремниевой структуры фототиристора и радиальное распределение температуры в момент времени максимального выделения мощности

Кривая 1 описывает распределение температуры для структуры с оптимизированным значением сопротивления токоограничивающего резистора. Кривая 2 соответствует неоптимизированной структуре фототиристора без встроенного токоограничивающего резистора.

Как видно из результатов моделирования, основным физическим фактором, ограничивающим допустимую скорость нарастания коммутируемого тока, является значительный разогрев структуры в области управляющего электрода в первоначальный момент включения. Сильнее всего при этом перегружается первая ступень регенеративного управляющего электрода. Температура в этой области при высоких значениях di_T / dt может достичь критического значения, при котором образуется токовый шнур, являющийся причиной теплового разрушения тиристора. Токовый шнур возникает, как правило, в результате того, что преобладающим механизмом модуляции проводимости локальных участков *n*-базы становится процесс термогенерации. Критическая температура образования токового шнура составляет 400–600 °С.

С целью минимизации энергии потерь при переключении и обеспечения высоких значений di_T / dt была разработана специальная конструкция

регенеративных каскадов и встроенных в структуру фототиристора резисторов, ограничивающих ток на начальном этапе включения тиристора. Степень перегрева первой ступени регенеративного управляющего электрода зависит от значения сопротивления встроенных токоограничивающих резисторов, которые можно изменять методом меза-травления канавки *p*-базы. Из рис. 5 видно, что в неоптимизированной структуре фототиристора область резистора R_1 нагревается до температуры, близкой к 120 °С. Увеличение сопротивления токоограничивающего резистора для оптимизированной структуры позволяет на 30 °С снизить температуру разогрева R_1 . Экспериментальная зависимость сопротивления токоограничивающего резистора от глубины травления *p*-базы приведена на рис. 6. На рис. 7 приведен экспериментальный график зависимости минимального анодного напряжения от сопротивления встроенного резистора.

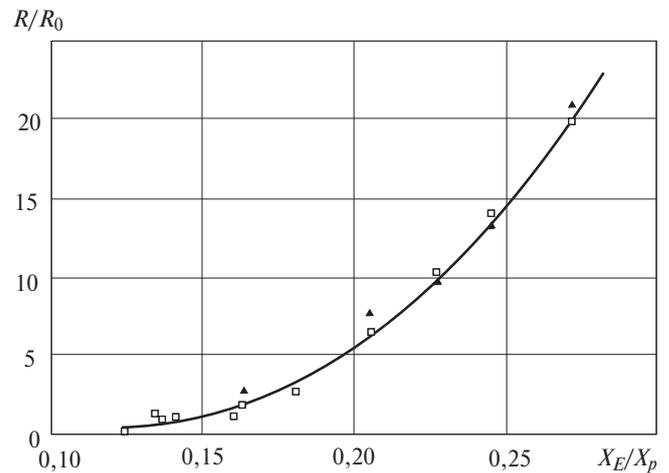


Рис. 6. График зависимости сопротивления токоограничивающего резистора от глубины травления канавок *p*-базы

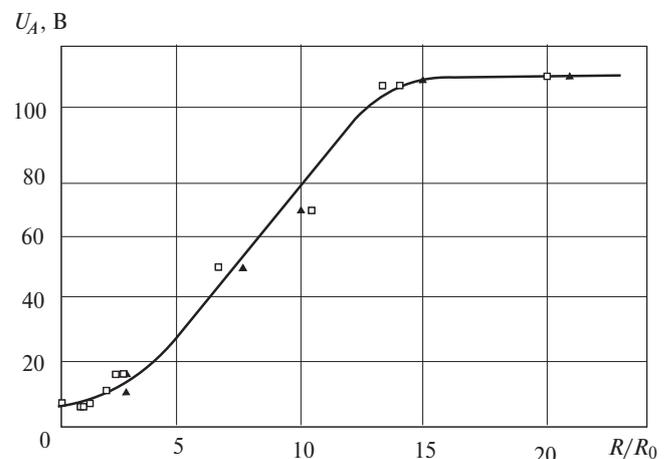


Рис. 7. Экспериментальный график зависимости минимального анодного напряжения от сопротивления встроенного резистора

Данные результатов исследований позволили определить оптимальные значения сопротивления токоограничивающих резисторов. Это позволило достичь высокого значения di_T / dt и в то же время обеспечить минимальное значение анодного напряжения (20 В), при котором ещё возможно включение фототиристора.

С целью определения предельных коммутационных возможностей фототиристора в импульсном режиме была проведена серия его испытаний. На рис. 8 приведены осциллограммы анодного тока и светового импульса управления при испытаниях по определению критической скорости нарастания тока в открытом состоянии. Для включения фототиристора в тестовой схеме применялся лазерный диод импульсной мощностью 150 мВт. Напряжение заряда емкости источника питания $U_A = 4000$ В.

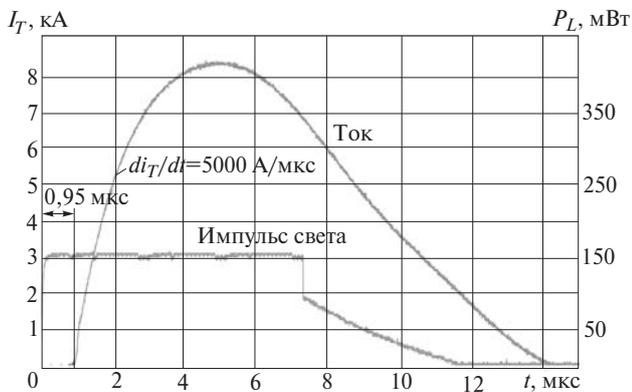


Рис. 8. Осциллограммы анодного тока фототиристора и светового импульса управления

Из рис. 8 видно, что разработанная конструкция фототиристора позволяет коммутировать импульсы тока со скоростью нарастания 5000 А/мкс. Исследования при более высоких di_T / dt не проводились из-за ограниченных возможностей тестовой схемы.

Испытания разработанных приборов также проводились в составе высоковольтной сборки из трех последовательно соединенных фототиристоров (рис. 9,а), предназначенной для комплектации емкостного накопителя энергии на 5 кВ, 50 кДж. Эквивалентная схема стенда для испытаний приведена на рис. 9,б.

Для определения предельно допустимых значений импульсных токов в субмиллисекундном диапазоне проводились испытания силовой сборки из трех фототиристоров в составе конденсаторной ячейки емкостного накопителя энергии. В процессе испытаний сборка выдержала 500 циклов разряда емкостного накопителя, амплитуда коммутируемого тока составила 106 кА. В процессе испытаний регистрировались ток через тиристор и падение напряжения на нем при протекании импульса тока.

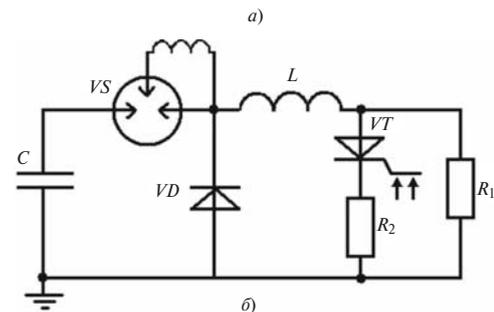
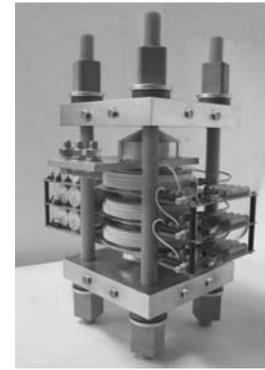


Рис. 9. Силовая сборка емкостного накопителя (а) и эквивалентная схема стенда для испытаний фототиристора (б)

На рис. 10 представлены осциллограммы разрядного тока и напряжения на фототиристоре с блокирующим напряжением 4,2 кВ.

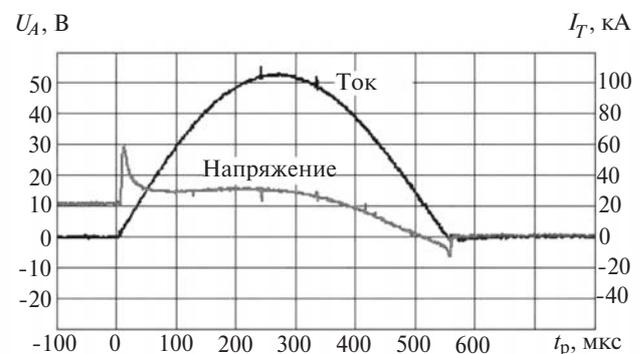


Рис. 10. Осциллограммы разрядного тока и напряжения на тиристоре

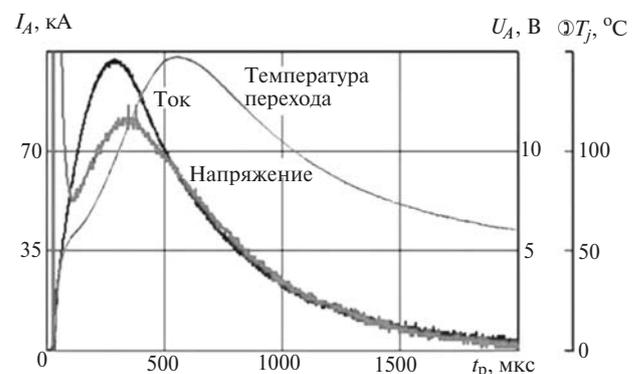


Рис. 11. Диаграммы разрядного тока, напряжения на тиристоре и расчетных значений температуры кремниевой структуры

На ресурс работы импульсных твердотельных ключей сильное влияние оказывает температурный перепад в момент прохождения импульсов тока через полупроводниковую структуру. Теоретическое подтверждение работоспособности фототиристора в импульсных режимах сводится к расчету максимальной температуры полупроводниковой структуры в момент прохождения импульса тока. При расчете учитывались реальная топология полупроводниковой структуры фототиристора и зависимость скорости распространения включенного состояния от плотности тока. На рис. 11 представлена расчетная временная зависимость температуры полупроводниковой структуры фототиристора при прохождении импульса тока 100 кА. Как видно из рисунка, максимальная температура не превышает 150 °С, что намного меньше предельной температуры (400–600 °С), при которой процессы термогенерации могут привести к разрушению полупроводниковой структуры прибора.

Основные параметры разработанного фототиристора ТФИ193-2500 для импульсных применений приведены ниже:

| Параметр | Значение |
|---|------------|
| Повторяющееся импульсное обратное напряжение U_{RRM} и повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии U_{DRM} , В | 4200 |
| Максимально допустимый средний ток в открытом состоянии при температуре корпуса $T_C = 70$ °С $I_{T(AU)}$, А | 2500 |
| Амплитуда импульсного тока в открытом состоянии $I_{peak-pulse}$, кА | 100 |
| Ударный ток в открытом состоянии I_{TSM} , кА | 50 |
| Критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии $(di_T/dt)_{cr}$, А/мкс | 5000 |
| Критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии $(du_D/dt)_{cr}$, В/мкс | 2000 |
| Оптическая мощность управления P_{LM} , мВт | 40 |
| Температура перехода T_j , °С | -40 ÷ +125 |
| Время выключения (типичное значение) t_q , мкс | 320 |
| Заряд обратного восстановления Q_{rr} , мкКл | 2400 |
| Тепловое сопротивление переход – корпус R_{thjc} , °С/Вт | 0,065 |
| Масса m , кг | 3,0 |
| Усилие сжатия F , кН | 70–90 |

Вывод. Представлены результаты разработки и исследований высоковольтных мощных фототиристоров. Испытания выявили высокую надежность и эффективность фототиристоров. Работы по совершенствованию фототиристоров ведутся в направлении дальнейшей оптимизации их параметров, характеристик и функциональных возможностей, что позволит реализовать дополнительные функции самозащиты от пробоя в различных несанкционированных режимах работы, снизить потери, увеличить рабочие напряжения и предельные коммутлируемые токи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Short Form Catalog 2010, High Power Semiconductor for Industrial Applications, Infineon AG.

2. Мартыненко В.Г., Хапугин А., Гришанин А. и др. Разработка мощных фототиристоров с функциями самозащиты. – Силовая электроника, 2009, №5.

Авторы: Конюхов Андрей Васильевич окончил электротехнический факультет Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева (МГУ им. Н.П. Огарева) в 1964 г. Начальник сектора ФГУП ВЭИ.

Веселова Инна Михайловна окончила факультет электронной техники Московского энергетического института в 1963 г. Старший научный сотрудник ФГУП ВЭИ.

Мартыненко Валентин Александрович окончил электротехнический факультет МГУ им. Н.П. Огарева в 1965 г. Директор научно-инженерного центра силовых полупроводниковых приборов ОАО «Электровыпрямитель» (г. Саранск).

Хапугин Алексей Александрович окончил факультет электронной техники МГУ им. Н.П. Огарева в 1988 г. Начальник конструкторского бюро ОАО «Электровыпрямитель».

Гришанин Алексей Владимирович окончил факультет электронной техники МГУ им. Н.П. Огарева в 2004 г. Начальник отдела биполярных приборов ОАО «Электровыпрямитель».