

# Разработка и исследование мощных фототиристоров

## для импульсных применений

**Представлены результаты исследований мощных тиристоров с прямым управлением светом для импульсных применений. Описывается конструкция нового тиристора с диаметром элемента 4" для коммутации тока амплитудой 100 кА длительностью 700 мкс. Данная работа является продолжением исследований ОАО «Электровыпрямитель» и ФГУП ВЭИ им. В. И. Ленина в области разработки мощных тиристоров с прямым управлением светом [1].**

**Валентин Мартыненко**

**Сергей Тундыков**

**Алексей Хапугин**

**Алексей Гришанин**

**Александр Плотников**

[martin@moris.ru](mailto:martin@moris.ru)

**Андрей Конюхов**

[cont@vei.ru](mailto:cont@vei.ru)

Проблемы генерации, формирования и преобразования импульсной мощности регулярно обсуждаются на ежегодных международных симпозиумах в Европе, Азии и США, их актуальность подтверждается многочисленными ежегодными конференциями по высоковольтной импульсной тематике. В современной силовой импульсной технике существует постоянная потребность в использовании надежных в эксплуатации ключей для коммутации коротких импульсов тока с амплитудой несколько десятков и тысяч ампер. Специфика высоких напряжений в мощной импульсной технике резко сужает номенклатуру и одновременно повышает технологические требования к применяемой элементной базе. Твердотельные полупроводниковые ключи весьма привлекательны для использования в импульсных системах питания, что связано, прежде всего, с высокой надежностью полупроводниковых приборов, большим сроком службы, низкими эксплуатационными расходами, экологической безопасностью. Поэтому такие ключи находят применение в аппаратуре для создания сверхмощных электромагнитных полей, для питания мощных лазеров и в других схемах импульсной энергетики.

Исследования показывают, что одним из перспективных твердотельных ключей для коммутации сверхбольших мощностей в микросекундном и субмиллисекундном диапазонах являются быстродействующие тиристоры, управляемые светом [2, 3]. Использование тиристоров, управляемых светом (ЛТТ), позволяет применять простые и надежные схемотехнические решения в сложных проектах, связанных как с передачей электрической энергии, так и с импульсной коммутацией сверхбольших мощностей.

Особенность работы тиристоров в импульсных режимах связана с коммутацией одиночных или редко повторяющихся мощных импульсов тока с амплитудой, близкой к максимально допустимым значениям ударных токов. Это приводит к выделению

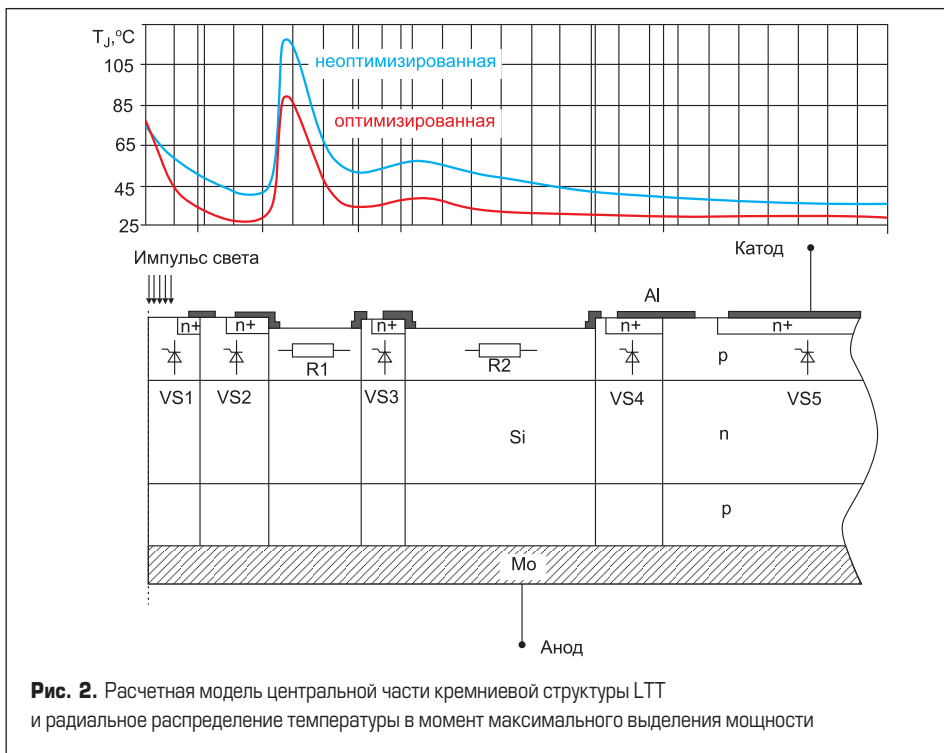
большого количества тепла в полупроводниковой структуре тиристора, что ограничивает коммутационную способность прибора. Из-за физических особенностей работы тиристоров включение их по всей площади полупроводниковой структуры происходит не одновременно. Это дополнительно накладывает ограничения по амплитуде прямого тока. При работе высоковольтных тиристоров на коротких импульсах тока (менее 1 мс) необходимо учитывать потери, связанные с распространением включенного состояния. Время полного включения тиристоров зависит от электрофизических свойств кремниевой структуры, плотности шунтов катодного эмиттера, топологии управляющего электрода полупроводниковой структуры тиристора, величины проходящего через тиристор тока и т. д. В рамках данной работы были проведены расчеты и экспериментальные исследования, направленные на минимизацию времени полного включения и повышение способности тиристоров коммутировать большие токи с высокими  $di_T/dt$ .

### Конструкция импульсного фототиристора

На рис. 1 представлена топология разработанного полупроводникового элемента ЛТТ для импульсных



**Рис. 1.** Конструкция полупроводникового элемента фототиристора для импульсных применений



**Рис. 2.** Расчетная модель центральной части кремниевой структуры LTT и радиальное распределение температуры в момент максимального выделения мощности

применений. Светочувствительная область располагается в центре полупроводниковой структуры. Характерной особенностью топологии LTT является высокая степень разветвления управляющего электрода и наличие регенеративного каскада вспомогательных тиристоров. Разветвление управляющего электрода позволяет сократить время распространения включенного состояния и тем самым снизить коммутационные потери при включении. Каскад вспомогательных тиристоров необходим для усиления слабого тока управления, возникающего в результате генерации носителей заряда при облучении импульсами света специальной светочувствительной области тиристора.

В процессе разработки была проведена оптимизация топологии и параметров диффузионных слоев с целью повышения оптической чувствительности управления, минимизации энергии потерь при переключении и обеспечения высоких значений  $di_T/dt$ .

Требование обеспечения высокой  $di_T/dt$ -стойкости было достигнуто главным образом за счет разработки специальной конструкции регенеративных каскадов и встроенных в структуру LTT сопротивлений, ограничивающих ток на начальном этапе включения тиристора.

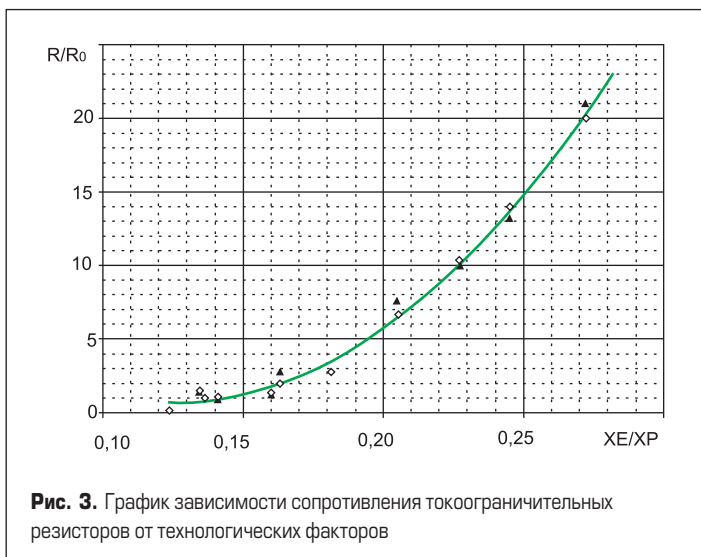
Работоспособность и надежность тиристоров в импульсных режимах при коммутации импульсов тока с высокими  $di_T/dt$  сильно зависят от динамического распределения температуры по объему полупроводниковой структуры LTT. Высокие плотности тока на начальном этапе включения приводят к перегреву тиристора в 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 LTT. На рис. 2 приведены его результаты. Кривая

красного цвета описывает распределение температуры для структуры с оптимизированным значением токоограничивающих сопротивлений R1, R2. Кривая синего цвета соответствует неоптимизированной структуре LTT, без встроенных токоограничивающих резисторов.

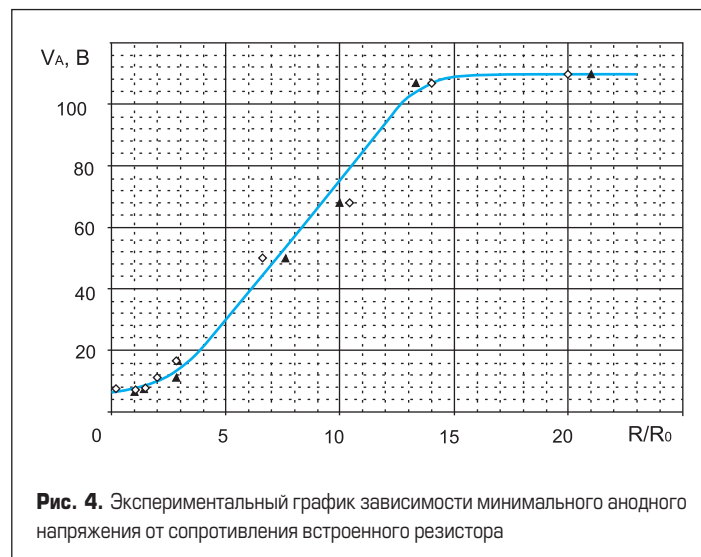
Как видно из результатов моделирования, основным физическим фактором, ограничивающим допустимую скорость возрастания коммутируемого тока, является значительный разогрев структуры в области управляющего электрода в первоначальный момент включения. Сильнее всего при этом перегружается вторая ступень регенеративного 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. Он возникает, как правило, в результате того, что преобладающим механизмом модуляции проводимости локальных участков *n*-базы становится процесс термогенерации. Критическая температура образования токового шнура — +400...+600 °С.

Степень перегрева второй ступени регенеративного управляющего электрода зависит от величины встроенных токоограничивающих сопротивлений. Рис. 2 показывает, что в неоптимизированной структуре LTT область резистора R1 нагревается до температуры, близкой к  $T_j = +120$  °С. Увеличение токоограничивающего сопротивления для оптимизированной структуры позволяет на 30 °С уменьшить температуру разогрева R1. Экспериментальную зависимость токоограничительных сопротивлений от технологических факторов иллюстрирует рис. 3. На рис. 4 приведен экспериментальный график зависимости минимального анодного напряжения от встроенного сопротивления.

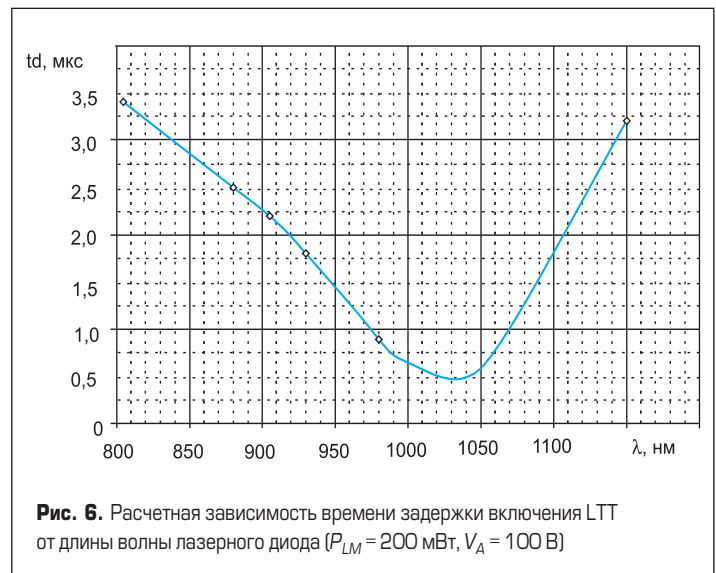
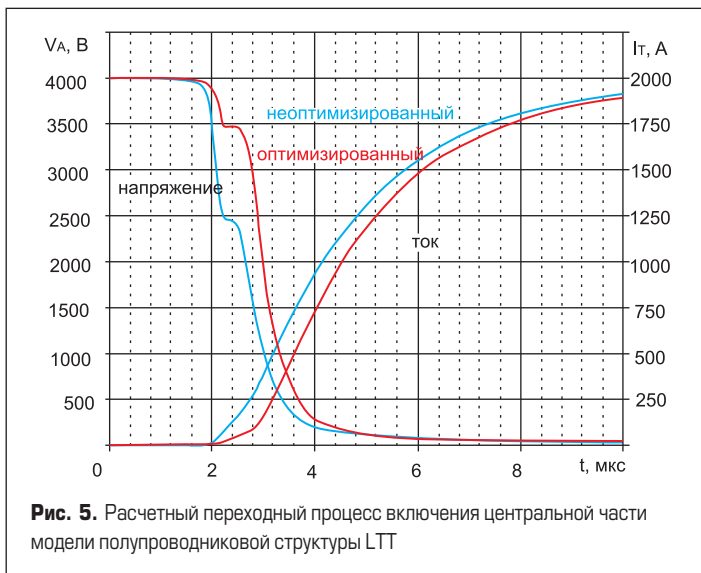
В результате проведенных исследований были определены оптимальные значения токоограничительных сопротивлений, позволяющие получить высокое значение  $di_T/dt$  и в то же время обеспечить минимальное значение анодного напряжения  $V_{Amin} \leq 20$  В,



**Рис. 3.** График зависимости сопротивления токоограничительных резисторов от технологических факторов



**Рис. 4.** Экспериментальный график зависимости минимального анодного напряжения от сопротивления встроенного резистора



при котором еще возможно включение ЛТТ. На рис. 5 приведены кривые тока и напряжения при переходном процессе включения ЛТТ для двух вариантов структур: неоптимизированной и оптимизированной (со встроенным сопротивлением). Эти графики показывают, что с ростом токоограничительного сопротивления время задержки включения становится больше, но незначительно.

ЛТТ управляется световым импульсом ИК-диапазона. Правильный выбор длины волны излучателя очень важен для эффективной работы ЛТТ и обусловлен особенностью конструкции разрабатываемого фототиристора с большой глубиной залегания коллекторного *p-n*-перехода. На рис. 6 приведена расчетная зависимость времени задержки включения ЛТТ от длины волны лазерного диода (импульсная мощность 200 мВт).

Результаты проведенных расчетов указывают на то, что оптимум длины волны излучателя для управления разработанных ЛТТ находится 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. Эффективность светового излучения падает

и в том случае, когда длина волны света становится меньше 1,0 мкм, поскольку с уменьшением длины электромагнитной волны сокращается глубина ее проникновения и, как следствие, неравновесные электронно-дырочные пары рекомбинируют вблизи поверхности. Спектр излучения применяемых лазерных диодов лежит в непосредственной близости от вышеуказанной оптимальной области длин волн.

Важной проблемой при разработке фототиристора является создание области управления ЛТТ с высокой световой чувствительностью, так как, несмотря на усовершенствованные источники 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  $dv_T/dt$ . Для обеспечения большой величины  $dv_T/dt$  светочувствительная область должна быть небольшой площади, что, в свою очередь, приводит к ограничению первоначальной площади включения и величины скорости нарастания тока в открытом состоянии  $di_T/dt$ .

В процессе разработки фототиристора была решена одна из важнейших для ЛТТ задач, связанная, с одной стороны, с необходимостью повышения оптической чувствительности управления и минимизации энергии потерь при переключении, а с другой стороны — с необходимостью обеспечения высоких значений  $dv_T/dt$  и положительной температурной зависимости напряжения переключения. Разработанные тиристоры реально управляются оптической мощностью не более 20 мВт и выдерживают  $dv_T/dt = 5000$  В/мкс.

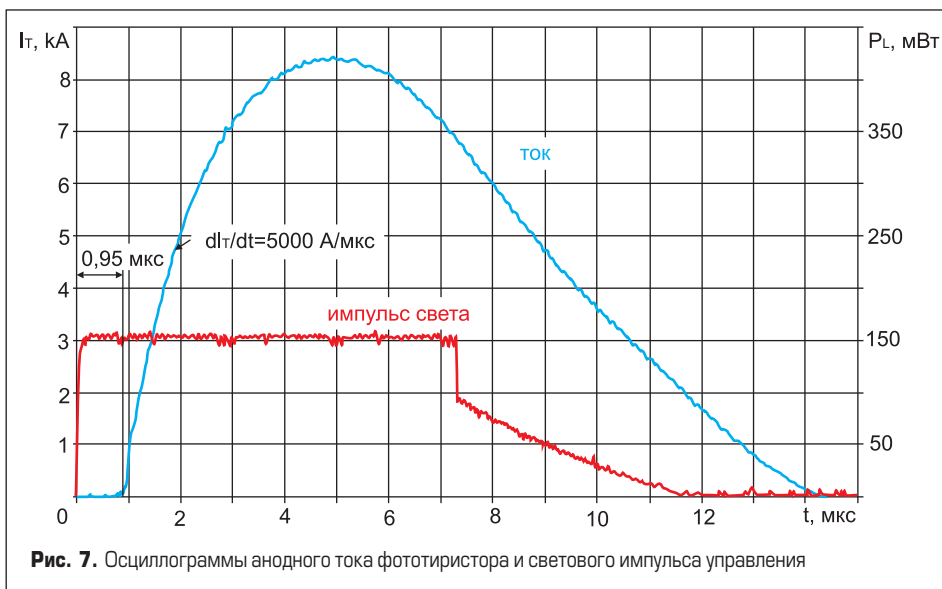
### Результаты испытаний

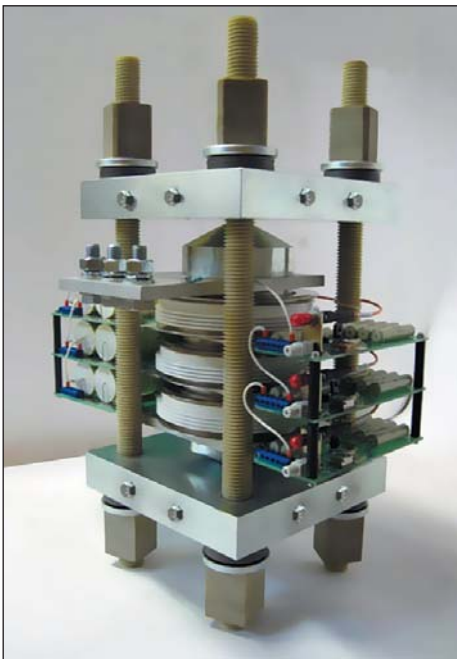
С целью определения предельных коммутационных возможностей ЛТТ в импульсном режиме была проведена серия его испытаний. На рис. 7 приведены осциллограммы анодного тока и светового импульса управления при испытаниях на определение критической скорости нарастания тока в открытом состоянии. Для включения ЛТТ в тестовой схеме применялся лазерный диод с длиной волны оптического излучения  $\lambda = 0,88$  мкм и импульсной мощностью  $P_L = 150$  мВт. Напряжение заряда емкости  $V_A = 4000$  В.

Рис. 7 свидетельствует о том, что разработанная конструкция тиристора позволяет коммутировать импульсы тока со скоростью нарастания 5000 А/мкс. Испытания при более высоких  $di_T/dt$  не проводились из-за ограниченных возможностей тестовой схемы.

Испытания разработанных приборов в разрядном контуре на большие токи проводились в составе высоковольтной сборки из трех последовательно соединенных ЛТТ (вид сборки показан на рис. 8), предназначенной для комплектации емкостного накопителя энергии 5 кВ, 50 кДж. Эквивалентная схема емкостного накопителя приведена на рис. 9.

В результате проведенных экспериментов по проверке работоспособности разработанных ЛТТ в составе макета конденсаторной ячейки было обнаружено, что импульсное напряжение на тиристорах при их выключении в два раза превышает величину зарядного напряжения (5 кВ). Такие импульсные



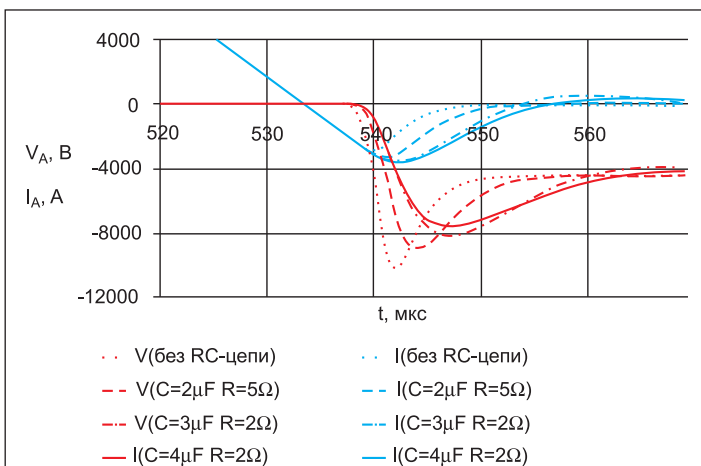


**Рис. 8.** Силовая сборка емкостного накопителя на основе трех фототиристоров

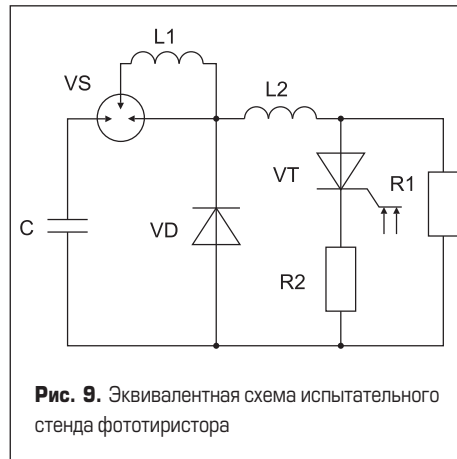
перенапряжения, которые могут вывести из строя ЛТТ, возникают из-за обрыва тока в индукторе L конденсаторной ячейки в процессе обратного восстановления тиристоров. Для снижения этих перенапряжений использовались снабберы RC-цепи. На рис. 10 представлена эквивалентная схема цепи защиты тиристоров при обратном восстановлении.

С целью определения оптимальных параметров RC-цепей и заряда обратного восстановления ЛТТ было проведено их компьютерное моделирование. Из результатов расчета сборки из трех последовательно соединенных ЛТТ были определены импульсные напряжения при их обратном восстановлении.

При выполнении расчетов варьировались параметры RC-цепей ( $C = 0-4$  мкФ,  $R = 2-5$  Ом) и были использованы два варианта полупроводниковой структуры ЛТТ:



**Рис. 11.** Расчетные осциллограммы тока и напряжения высоковольтной сборки из трех последовательно соединенных фототиристоров при обратном восстановлении

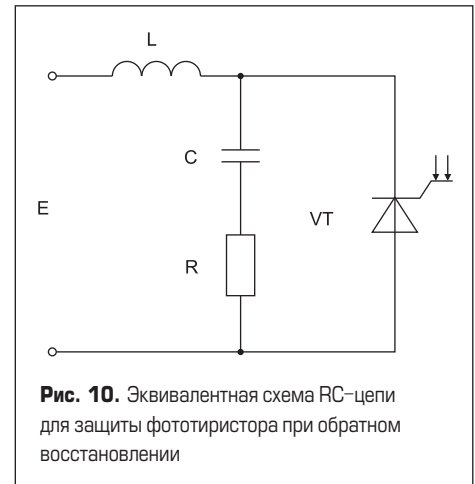


**Рис. 9.** Эквивалентная схема испытательного стенда фототиристора

- структура без регулирования заряда обратного восстановления ( $Q_{RR} = 20$  мКл,  $V_{TM} = 2,0$  В);
  - структура с регулированием заряда обратного восстановления ( $Q_{RR} = 10$  мКл,  $V_{TM} = 2,4$  В).
- По результатам моделирования (рис. 11) был определен оптимальный вариант для данной сборки с допустимым значением перенапряжений  $V_{OV} \leq 7,5$  кВ, который реализован с использованием полупроводниковой структуры ЛТТ на основе второго варианта с применением снабберов  $C = 3-4$  мкФ и  $R = 2$  Ом.

Испытания тиристоров в реальной схеме показали, что дальнейшее увеличение номиналов RC-цепей слабо влияет на значения коммутационных перенапряжений и основным способом снижения их является уменьшение заряда обратного восстановления ЛТТ.

Величину заряда обратного восстановления у полупроводниковых приборов для широкого диапазона значений можно с хорошей точностью считать прямо пропорциональной времени жизни неосновных носителей заряда в n-базе. Практически все методы уменьшения времени жизни в монокристаллическом кремнии основаны на создании дополнительных центров рекомбинации носителей заряда через ловушки, вводимые в объем кристалла радиационными методами при облучении полупроводника пучком частиц высоких энергий. Получение требуемых значений заряда обратного восстановления достигалось

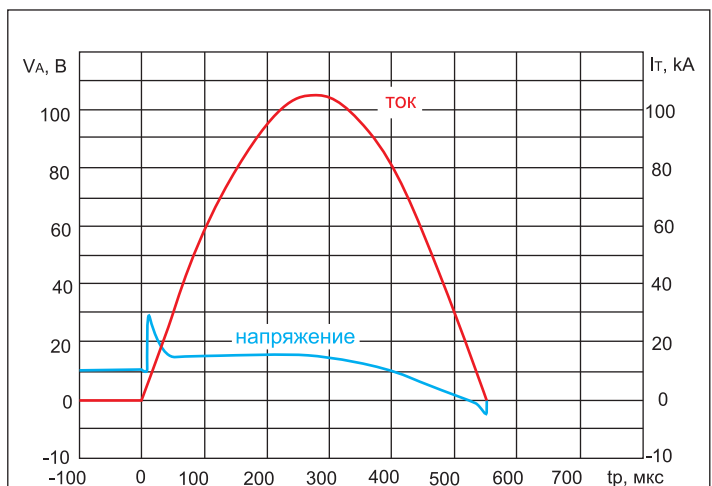


**Рис. 10.** Эквивалентная схема RC-цепи для защиты фототиристора при обратном восстановлении

с помощью слабого электронного облучения кремниевых структур ЛТТ, что позволило минимизировать технологический разброс параметра  $Q_{RR}$  и снизить коммутационные перенапряжения с сохранением оптимального значения  $V_{TM}$ . В результате оптимизации значений зарядов обратного восстановления ЛТТ амплитуда коммутационных перенапряжений уменьшена до уровня, безопасного для работы тиристоров.

С целью установления предельно допустимых значений импульсных токов в субмиллисекундном диапазоне проводились испытания силовой сборки из трех ЛТТ в составе конденсаторной ячейки емкостного накопителя энергии. В процессе испытаний эта сборка выдержала 500 циклов разряда емкостного накопителя, при этом амплитуда коммутируемого тока составила 106 кА. В процессе испытаний регистрировались ток через тиристор и падение напряжения на нем при протекании импульса тока. На рис. 12 представлены осциллограммы разрядных токов и напряжений на ЛТТ с блокирующим напряжением 4,2 кВ.

На ресурс работы импульсных твердотельных ключей сильное влияние оказывает температурный перепад в момент прохождения импульсов тока через полупроводниковую структуру. Теоретическое подтверждение работоспособности ЛТТ в импульсных режимах



**Рис. 12.** Осциллограммы разрядных тока и напряжения



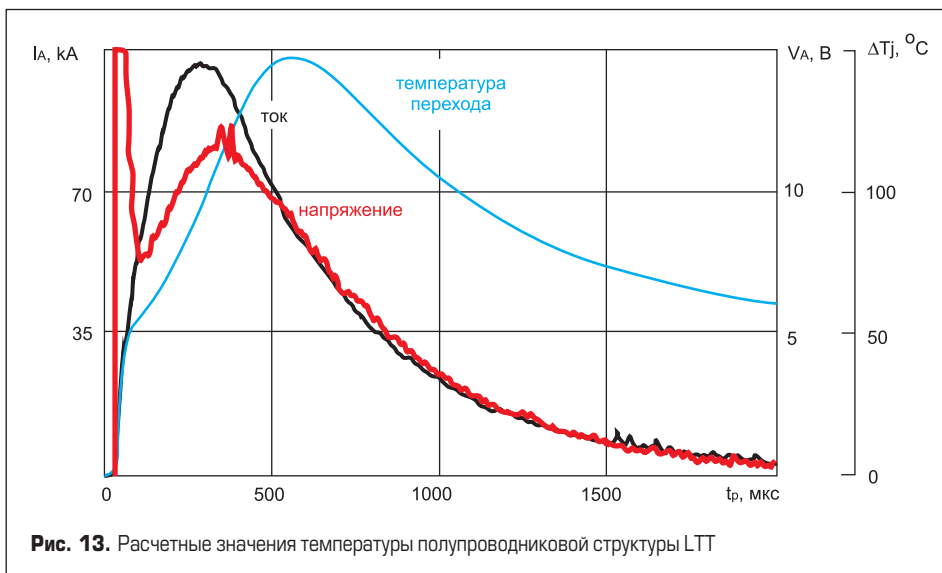


Рис. 13. Расчетные значения температуры полупроводниковой структуры LTT

Таблица. Параметры импульсного фототиристора ТФИ193-2500

Параметр	Значение
Повторяющееся импульсное обратное напряжение и повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии — $V_{RRM}, V_{DRM}$ , В	4200
Максимально допустимый средний ток в открытом состоянии при температуре корпуса $T_c = +70\text{ °C}$ — $I_{T(AV)}$ , А	2500
Амплитуда импульсного тока в открытом состоянии — $I_{peak-pulse}$ , кА	100
Ударный ток в открытом состоянии — $I_{SM}$ , кА	50
Критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии — $(di_T/dt)_{crit}$ , А/мкс	5000
Критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии — $(dv_D/dt)_{crit}$ , В/мкс	2000
Оптическая мощность управления — $P_{LM}$ , мВт	40
Температура перехода — $T_p$ , °C	-40...+125
Время выключения (тип. знач.) — $t_{qr}$ , мкс	320
Заряд обратного восстановления — $Q_{rr}$ , мкКл	2400
Тепловое сопротивление переход-корпус — $R_{thjc}$ , °C/Вт	0,065
Масса — $m$ , кг	3,0
Усилие сжатия — $F$ , кН	70-90

сводится к расчету максимальной температуры полупроводниковой структуры в момент прохождения импульса тока. Расчеты были проведены при помощи разработанной модели, в которой учитывалась реальная топология полупроводниковой структуры LTT

и зависимость скорости распространения включенного состояния от плотности тока.

На рис. 13 представлена расчетная временная зависимость температуры полупроводниковой структуры тиристора при прохождении импульса тока 100 кА.

На рис. 13 видно, что максимальная температура не превышает +150 °C, что намного меньше предельной температуры (+400...+600 °C), при которой процессы термогенерации могут привести к разрушению полупроводниковой структуры тиристора.

Основные параметры разработанного тиристора приведены в таблице.

### Заключение

В статье представлены результаты разработки и исследований мощных высоковольтных фототиристоров, предназначенных для импульсных применений. Проведенные испытания показали высокую надежность и перспективность использования фототиристоров. Работы над импульсными фототиристорами в настоящее время не завершены. Планируется дальнейшая их оптимизация, которая позволит, по нашим оценкам, в полтора-два раза увеличить предельные коммутируемые токи в субмиллисекундном диапазоне.

Авторы выражают благодарность начальнику лаборатории Научно-исследовательского института электрофизической аппаратуры имени Д.В. Ефремова Фридману Борису Эммануиловичу за проведенные испытания фототиристоров в разрядном контуре на большие токи.

### Литература

1. Мартыненко В., Хапугин А., Гришанин А., Чибиркин В., Конюхов А. и др. Разработка мощных фототиристоров с функциями самозащиты // Силовая электроника. 2009. № 5.
2. Przybilla J., Keller R., Kellner U., Schulze H.-J., Niedernostheide F.-J., Peppel T. Direct light-triggered solid-state switches for pulsed power applications // Digest of Technical Papers 14th IEEE International PPC-2003. Vol.1.
3. Schulze H.-J., Niedernostheide F.-J., Kellner-Werdehausen U., Przybilla J., Uder M. High-voltage Thyristors for HVDC and Other Applications: Light-triggering Combined with Self-protection Functions. [www.infineon.com](http://www.infineon.com).