

Разработка мощных фототиристоров

с функциями самозащиты

Представлены результаты разработки ОАО «Электровыпрямитель» и ФГУП «ВЭИ» серии мощных низкочастотных тиристоров с прямым управлением светом (фототиристоров) с интегрированными функциями самозащиты для энергосберегающих электроприводов среднего напряжения, передачи электрической энергии и компенсации реактивной мощности.

**Валентин Мартыненко
Алексей Хапугин
Алексей Гришанин
Владимир Чибиркин, к. т. н.**

martin@moris.ru

**Андрей Конюхов
Инна Веселова
Алексей Сурма, к. т. н.**

cont@vei.ru

В условиях интенсивного развития электротехники и электроэнергетики, увеличения выработки, передачи и потребления энергии все более актуальной становится проблема совершенствования силовой электроники и ее элементной базы.

Согласно аналитическим и обзорным источникам информации о состоянии энергетики, за рубежом полупроводниковые управляемые вентили являются определяющими в устройствах с силовой электроникой. В США, Японии и Европе более 60% вырабатываемой электроэнергии проходит через полупроводниковые вентили. В России аналогичный показатель составляет 30%. Повышение этой цифры до мирового уровня позволит сэкономить 15% электроэнергии, что сравнимо с вкладом атомных или гидроэлектростанций.

Основными активными элементами полупроводниковых преобразователей электроэнергии являются мощные тиристоры (ETT), запираемые тиристоры (GTO, IGCT), биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) и др.

Анализ тенденций развития силовых полупроводниковых приборов показывает, что в ряде областей применения серьезную конкуренцию названным приборам могут составить мощные высоковольтные тиристоры с прямым управлением светом (LTT — Light Triggered Thyristor), которые дают простые и надежные схемотехнические решения стратегических проблем электротехники, электроэнергетики и других отраслей науки и техники.

Использование фототиристоров наиболее эффективно в устройствах с последовательным соединением приборов и высоким уровнем электромагнитных помех. Поэтому они нашли широкое применение в современных энергосберегающих преобразователях для линий передачи постоянного тока (HVDC), компенсаторов реактивной мощности (SVC), электроприводов среднего напряжения, а также в высоковольтных ключах для импульсных применений [1–5].

Фототиристоры обладают целым рядом преимуществ по сравнению с обычными тиристорами, которые включаются электрическими сигналами. К ним относятся прежде всего прямое управление импульсами света, точный временной контроль включения группы приборов, высоковольтная гальваническая развязка между схемой управления и силовой цепью, высокая помехоустойчивость, большие интервалы между профилактическими работами, простота и безопасность обслуживания устройств.

Так же, как и современные тиристоры с электрическим управлением, фототиристоры имеют низкие потери в проводящем состоянии и малые разбросы V_{TM} , Q_{RR} , I_{RR} , они устойчивы к значительным токовым перегрузкам и высоким $(di/dt)_{crit}$.

В кремниевую структуру фототиристоров интегрировано несколько защитных функций, что позволяет упростить или вообще исключить сложные и дорогие электронные схемы защиты от пробоя при внешних критических воздействиях. Все это дает возможность сократить количество элементов в схеме преобразователя, обеспечить высокие КПД и надежность системы в целом.

ОАО «Электровыпрямитель» в 2006–2009 гг. совместно с ФГУП «ВЭИ» разработало и освоило производство серии фототиристоров на токи 630–2000 А, напряжение до 7000 В. Ниже представлена краткая информация об этих перспективных приборах.

Описание конструкции фототиристора

Конструкция фототиристора аналогична конструкции высоковольтного таблеточного тиристора, только вместо электрического управляющего вывода фототиристор имеет оптический вход. Разработаны две модификации приборов, отличающиеся системами ввода светового сигнала в корпус прибора.

В первом варианте (рис. 1) в центре катодного основания фототиристора имеется оптическое окно, расположенное вблизи фоточувствительной обла-



Рис. 1. а) Фототиристор типа ТФ 353-630 с оптическим окном в катодном основании; б) пример подключения ЛТТ-адаптера к фототиристор и лазерному диоду



Рис. 2. Фототиристор ТФ173-1000 с оптической розеткой на катодном основании с подключенным световодом

сти полупроводниковой структуры. В данной конструкции для управления прибором применяется оптический интерфейсный кабель (ЛТТ-адаптер). Одним концом («крючком») он вставляется в паз катодного основания таблетки, вторым концом через оптический разъем соединяется с лазерным диодом. Импульс света поступает в фоточувствительную область кремниевой структуры от лазерного диода через оптоволоконный кабель, адаптер и оптическое окно. Особенность этой конструкции заключается в том, что подключение ЛТТ-адаптера необходимо производить до сборки фототиристора с охладителем.

Второй вариант конструкции фототиристора (рис. 2) имеет оптическую розетку, которая расположена на боковой поверхности катодного основания. В этом варианте управляющий импульс света, поступивший через оптоволоконный кабель на оптическую розетку, передается к фоточувствительной области структуры по отрезку световода внутри корпуса [6]. Такая конструкция ввода сигнала управления позволяет производить подключение световода к розетке фототиристора с помощью стандартных оптических разъемов

как до, так и после сборки прибора с охладителем или даже после монтажа всей силовой схемы преобразователя.

Управление фототиристором

Процесс включения

Фототиристор управляется световым импульсом ИК-диапазона. Выбор длины волны излучателя обусловлен особенностью конструкции разрабатываемого фототиристора с большой глубиной залегания коллекторного *p-n*-перехода.

На рис. 3 приведены схематическое изображение *p-n-p-n*-структуры и кривые поглощения излучения в кремнии для различных длин волн излучателя в соответствии с законом Бугера-Ламберта:

$$\Phi(x) = \Phi_0 \exp(-x/x_0),$$

где Φ_0 — поток излучения на поверхности полупроводника, x_0 — глубина поглощения, после прохождения которого поток излучения уменьшается в $e = 2,178$ раза.

Из приведенных иллюстраций следует, что optimum длины волны излучателя для управления фототиристором находится в диапазоне 0,9–1,05 мкм.

Управляющий импульс передается к светочувствительной области кремниевой структуры через оптоволоконный световод. Он соединяется оптическими разъемами с корпусом фототиристора и с излучающим лазерным диодом, например типа SPL-PL90 (фирма OSRAM), длина волны оптического излучения которого 0,88–0,98 мкм. Длина световода практически не ограничена, так как затухание сигнала управления в нем очень мало (порядка 1 дБ на 1 км). Лазерный диод преобразовывает электрический сигнал, поступающий от драйвера управления в световой импульс, который по форме и длительности практически повторяет электрический импульс. На рис. 4 представлены выходная оптическая мощность лазерного диода и рекомендованная форма импульса тока драйвера для управления фототиристорами фирмы Infineon.

При последовательном соединении фототиристоров можно использовать последовательное соединение лазерных диодов и один электрический драйвер. Также возможно применение одного лазерного диода для группы фототиристоров. В этом случае световой импульс разделяется на каждый фототиристор с помощью оптического разветвителя. Этот вариант потребует применения лазерных диодов с выходной мощностью до 1,5 Вт.

Включение фототиристора происходит следующим образом. В исходном состоянии при подаче положительного потенциала на анод относительно катода в окрестности коллекторного (центрального) *p-n*-перехода *p-n-p-n*-структуры фототиристора образуется область пространственного заряда (ОПЗ) с высоким электрическим сопротивлением. В этом случае фототиристор находится в закрытом состоянии. При подводе оптического сигнала к фоточувствительной области поток квантов света,

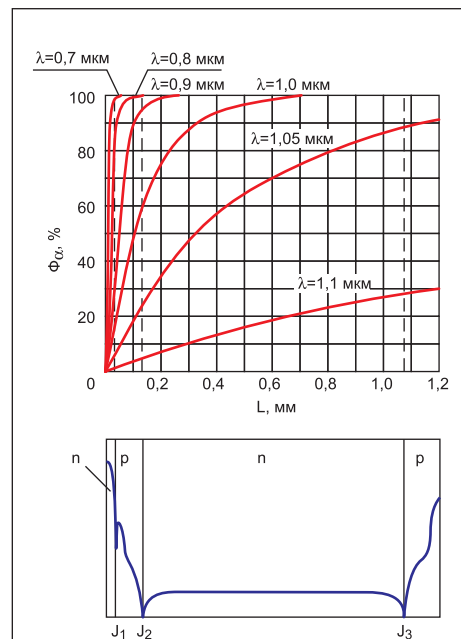


Рис. 3. Кривые поглощения излучения в кремниевой структуре фототиристора для различных длин волн

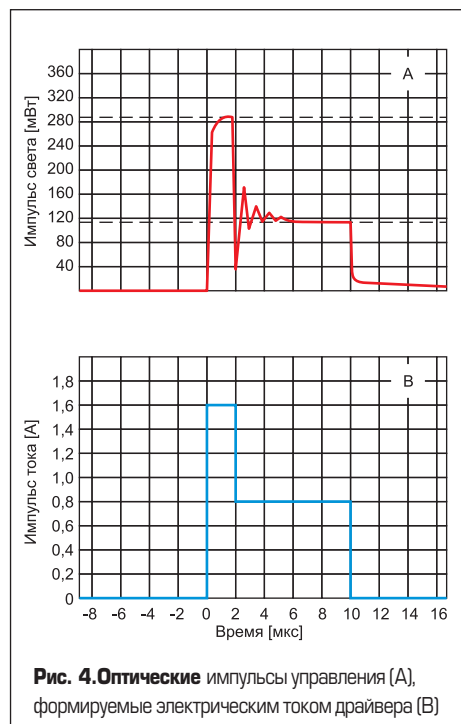


Рис. 4. Оптические импульсы управления (А), формируемые электрическим током драйвера (В)

частично поглощаясь в слое кремния, достигает ОПЗ. Энергия квантов света вызывает в ОПЗ процесс генерации пар свободных носителей заряда (электронов и дырок), которые разделяются электрическим полем и выбрасываются в базовые *p*- и *n*-слои. Избыточные электроны в *n*-базе и дырки в *p*-базе нарушают электрическую нейтральность в этих слоях, что вызывает инжекцию дырок из *p*-эмиттерного слоя и *n*-эмиттерного слоя. При достижении суммарного накопленного заряда в базовых слоях критического уровня фототиристор переходит в открытое состояние с малым электрическим сопротивлением. Таким образом, фототоки электронов и дырок в указанных слоях, поступающих из коллекторного *p-n*-перехода,

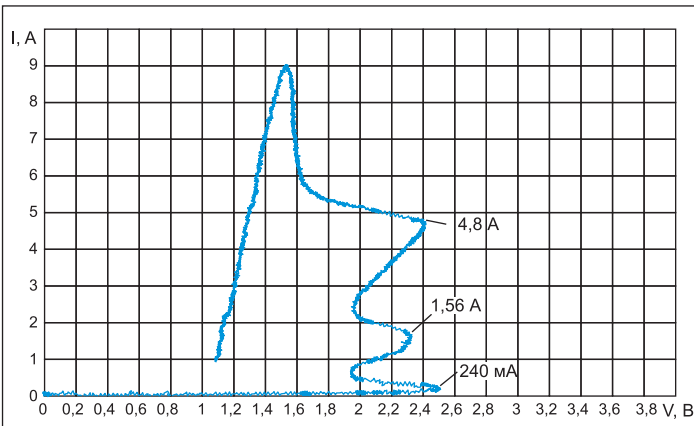


Рис. 5. Процесс включения регенеративных ступеней фототиристора на малых токах

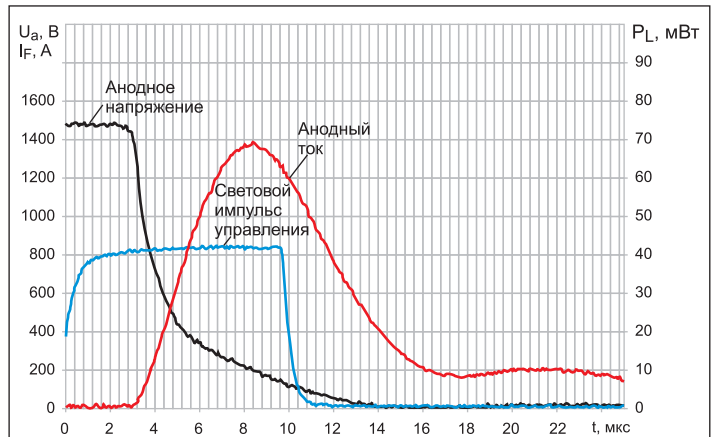


Рис. 6. Переходный процесс включения фототиристора

являются базовыми токами управления фототиристора по аналогии с током управления тиристором, управляемых внешними электрическими сигналами по базовым областям. В обоих случаях эффективность включения приборов определяется в основном зарядом, накопленным в тонком *p*-базовом слое.

Из изложенного следует, что включение происходит в той части полупроводниковой структуры, в которой достигнута критическая плотность тока *p*-базы и, соответственно, критическая плотность заряда. Составляющая фототока коллекторного *p-n*-перехода, не участвующая в этом процессе, радиально растекается по базовому *p*-слою, теряет плотность и не достигает критического уровня. Это означает, что при повышенных токах растекания для включения фототиристора необходимо увеличить оптическую мощность управления.

В соответствии с требованиями к разрабатываемым фототиристорам оптическая мощность управления не должна превышать 40 мВт. Это требование было выполнено за счет выбора оптимального диффузионного профиля полупроводниковой структуры ЛТТ, топологии фоточувствительной области, элементов усиления фототока и регенеративного управляющего электрода (РУЭ).

На рис. 5 показана осциллограмма прямой вольт-амперной характеристики фототиристора при малых токах нагрузки, демонстрирующая процесс включения регенеративных ступеней и силовой области прибора вблизи последней ступени регенерации.

В топологии низкочастотных фототиристоров РУЭ заложен с достаточно высокой степенью разветвления последней ступени регенерации. Исследования переходного процесса включения тестовых структур фототиристором с выбранной конструкцией РУЭ показали высокую стойкость к $(dI_T/dt)_{crit}$ (до 700 А/мкс), что в 2 раза выше нормированного значения.

На рис. 6 представлены осциллограммы анодного тока и напряжения при включении фототиристора оптическим сигналом мощностью 40 мВт. Видно, что тиристор легко включается световым импульсом длительностью 10 мкс. Время задержки включения при

этом около 3,5 мкс, что является нормой для данного класса приборов.

Интегрированная защита от пробоя

Проблема защиты от пробоя при переключении по аноду полупроводниковых приборов на основе многослойных структур с S-образной вольт-амперной характеристикой (тиристором, фототиристором, симистором и т. д.) связана с фундаментальными процессами локализации и шнурования тока в одном (наиболее проводящем) канале в выпрямительном элементе с последующим выходом прибора из строя вследствие теплового пробоя. Явление шнурования накладывает ограничения и на другие режимы коммутации (переключение по аноду при воздействии быстро нарастающего прямого напряжения со скоростью, превышающей критическую, восстановление запирающих свойств при наличии остаточного заряда в базовых областях многослойной структуры).

Функция интегрированной (встроенной) защиты от пробоя состоит в том, чтобы при коммутации в несанкционированном (критическом) режиме исключить неконтролируемый процесс шнурования тока в многослойной структуре прибора.

Одним из наиболее распространенных критических режимов, имеющих место при эксплуатации тиристором, является перенапряжение. В этом случае приложенное анодное напряжение превышает напряжение лавинного пробоя коллекторного *p-n*-перехода, что приводит к переключению прибора. Процесс переключения, как правило, происходит на ограниченном участке площади *p-n-p*-структуры с минимальной электрической прочностью и завершается деградацией выпрямительного элемента вследствие шнурования тока и проплавления кремниевой структуры.

Задача интегрированной защиты от пробоя вследствие перенапряжения состоит в том, чтобы сформировать внутренний сигнал управления и включить тиристор, прежде чем анодное напряжение на нем увеличится до напряжения переключения.

Для решения этой задачи в кремниевой структуре прибора (рис. 7) в пределах трехслойной *p-n-p*-области (области управления), расположенной под управляющим электродом (УЭ), создается локальный участок с пониженным по отношению к остальным областям структуры значением напряжения лавинного пробоя коллекторного (среднего) *p-n*-перехода

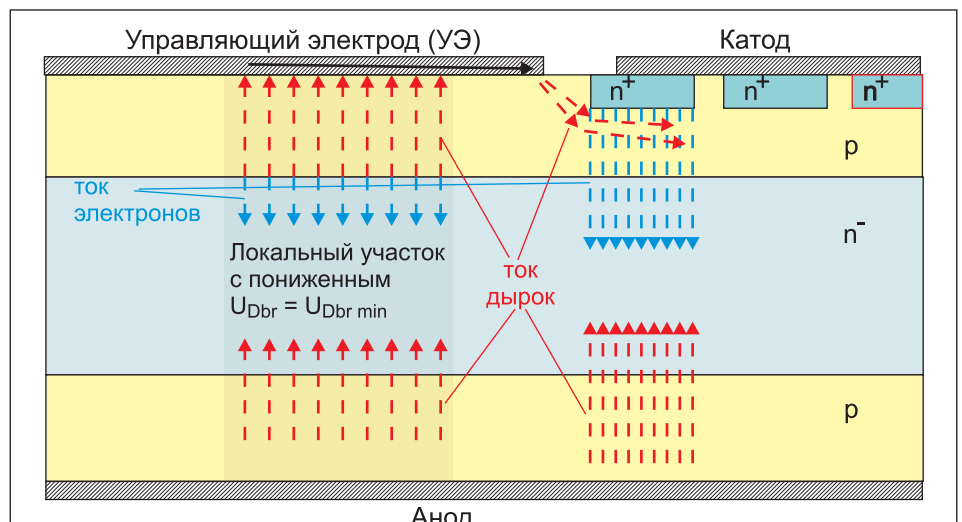


Рис. 7. Четырехслойная структура с элементом самозащиты от пробоя при перенапряжении

($V_{Dbr} = V_{Dbr \min}$). При превышении значения $V_{Dbr \min}$ прямого напряжения на тиристоре в локальном участке возникает ток лавинного пробоя, протекание которого по цепи «УЭ–катод» вызывает включение тиристорной структуры по описанному выше алгоритму. Указанный ток является, таким образом, внутренним сигналом управления тиристора.

Локальный участок с пониженным значением $V_{Dbr \min}$ может находиться как в пределах фоточувствительной области управления фототиристора, так и за ее пределами. Кроме того, если структура имеет многоступенчатое регенеративное управление, этот участок, в принципе, может быть расположен в пределах любой из областей управления. Значение $V_{Dbr \min}$ близко к напряжению переключения встроенного элемента самозащиты $V_{B0 \text{ ВЭС}}$, которое должно быть меньше напряжения переключения основной структуры ($V_{B0 \text{ ОС}}$).

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 [7]. На рис. 8 представлена зависимость напряжения переключения (V_{B0}) от дозы протонного облучения (Φ). Эта зависимость может быть использована при выборе Φ и регулировании V_{B0} с достаточно высокой точностью.

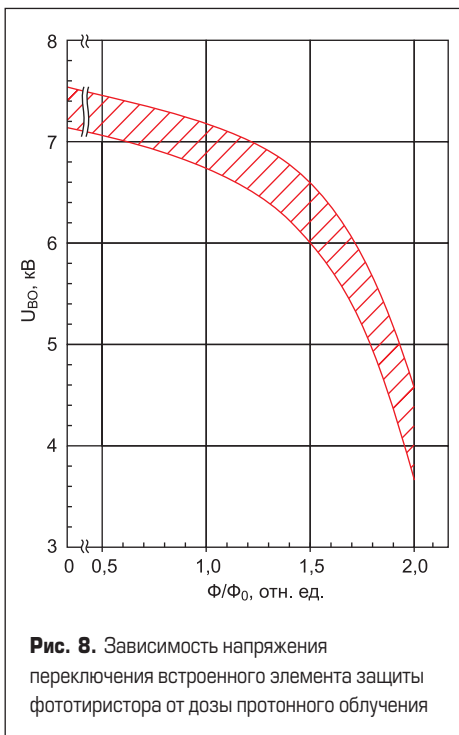


Рис. 8. Зависимость напряжения переключения встроенного элемента защиты фототиристора от дозы протонного облучения

Переключение при быстром нарастании прямого напряжения (эффект dV/dt) происходит за счет протекания емкостного тока коллекторного перехода $I_c = C(dV/dt)$, выполняющего роль тока управления при условии:

$$\int_{(t)} I_c(t) \times \exp(-t/\tau_n) dt = Q_{crit}$$

где τ_n — постоянная времени экспоненциального нарастания анодного тока на начальном

участке включения тиристора, Q_{crit} — критический заряд включения.

Проведенные эксперименты показали, что с ростом dV/dt после переключения наблюдается снижение напряжения на тиристоре на этапе модуляции сопротивления *n*-базы. Это является косвенным подтверждением расширения канала проводимости при повышенных значениях dV/dt , то есть с увеличением емкостного тока управления. Заряд, вносимый емкостным током, ограничен величиной $Q_{pn} = CV$, что не гарантирует равномерное включение прибора по всей площади вследствие флуктуации плотности критического заряда включения. При $Q_{pn} < Q_{crit}$ переключение вообще не происходит ни при каких значениях dV/dt .

Встроенный элемент самозащиты (ВЭС) от пробоя при переключении вследствие воздействия прямого напряжения, нарастающего с высокой скоростью (эффект dV/dt), должен удовлетворять условию

$$(dV_D/dt)_{crit \text{ ВЭС}} < (dV_D/dt)_{crit \text{ ОС}}$$

где $(dV_D/dt)_{crit \text{ ВЭС}}$ — критическая скорость нарастания прямого напряжения ВЭС, $(dV_D/dt)_{crit \text{ ОС}}$ — критическая скорость нарастания основной структуры.

Наиболее эффективным направлением управляемого изменения $(dV_D/dt)_{crit \text{ ВЭС}}$ является оптимизация конструкции первого каскада усиления фототиристора.



Рис. 9. Выпрямительный элемент фототиристора

На рис. 9 приведена фотография выпрямительного элемента одного из вариантов фототиристора с самозащитой от пробоя.

Сечение центральной части *p-n-p-n*-структуры фототиристора схематично изображено на рис. 10 (область А). Поверхностная шунтировка участков *n*-эмиттерных *p-n*-переходов условно показана резисторами $R_{ш2}$, $R_{ш3}$ и $R_{ш4}$.

Представленная конструкция по существу является интегральной схемой, содержащей активные элементы (тиристоры, транзистор,

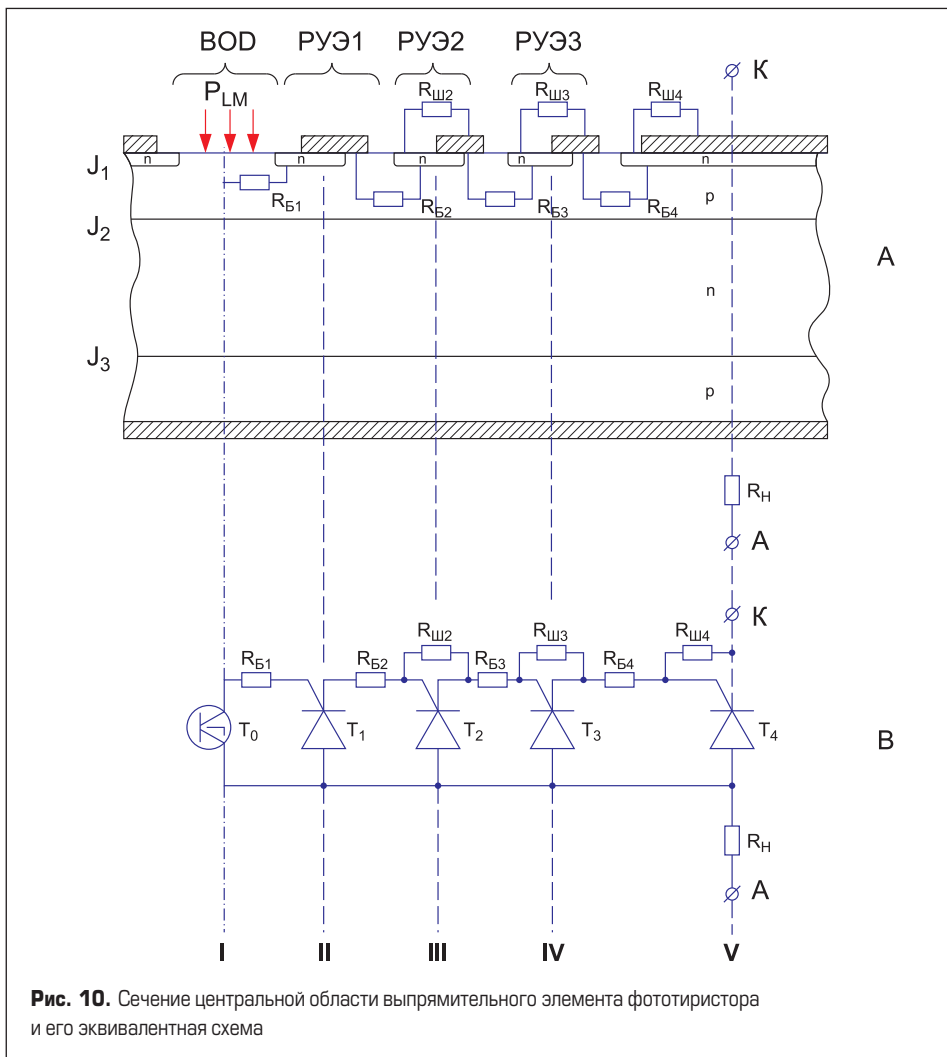


Рис. 10. Сечение центральной области выпрямительного элемента фототиристора и его эквивалентная схема

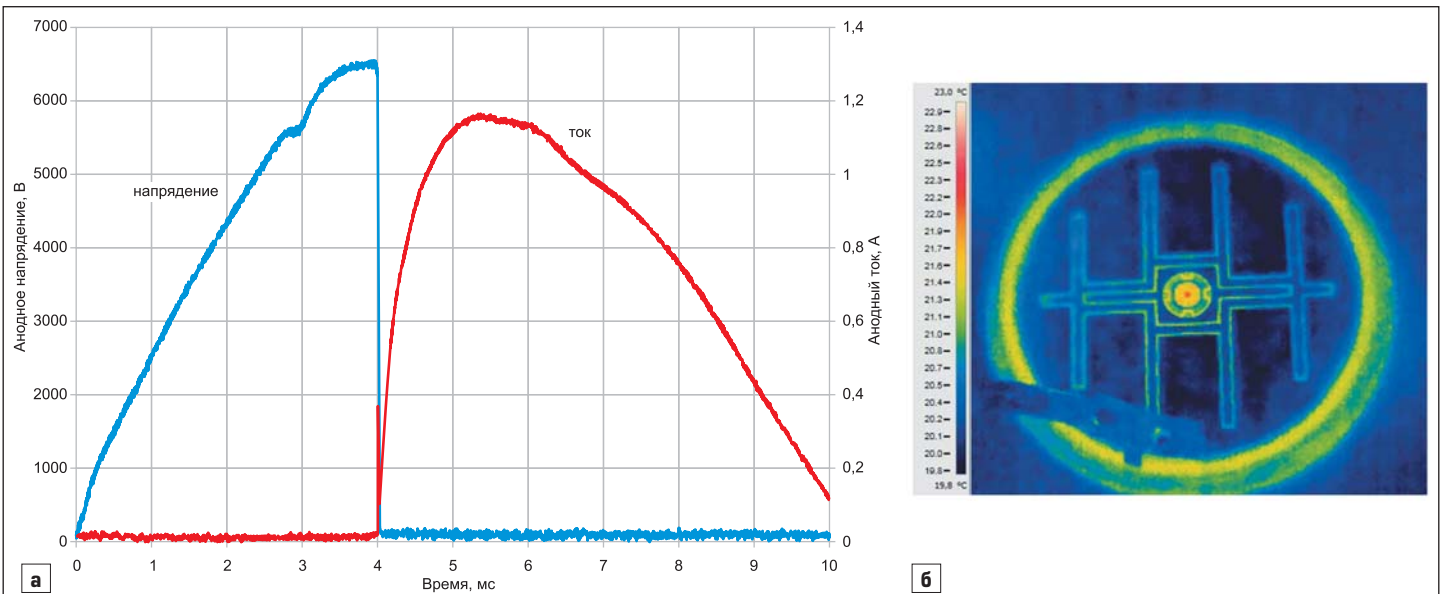


Рис. 11. Процесс срабатывания самозащиты фототиристора в тестовой схеме: а) осциллограммы тока и напряжения; б) тепловизионная картина элемента фототиристора, регистрирующая область первоначального включения («горячая» точка в центре)

динистор) и пассивные элементы (резисторы), соединенные между собой в объеме *p-n-p-n*-структуры поверхностной металлизации. Эквивалентная схема на дискретных элементах фототиристора дана на рис. 10 (область В).

Конструкция фототиристора и соответствующая ей интегральная схема содержат центральную фоточувствительную область, совмещенную с элементами самозащиты (I), три ступени регенерации (II, III, IV) и основной тиристор (V). Элементы II, III, IV являются вспомогательными тиристорными *p-n-p-n*-структурами, выполняющими функции промежуточных каскадов усиления тока

управления. Последний каскад, являющийся разветвленным регенеративным управляющим электродом (РПУЭ) с максимальным периметром границы первоначальной области включения основного тиристора, обеспечивает высокие значения критической скорости нарастания прямого тока (dI_T/dt)_{crit} фототиристора.

Работа встроженных элементов самозащиты фототиристора проверялась в тестовой схеме, которая формирует импульсы напряжения амплитудой до 10 кВ. Испытательная установка оснащена тепловизионной системой, позволяющей с высокой чувствительностью регистрировать ИК- и видеоизображения

областей локального пробоя в кремниевых структурах.

Рис. 11 наглядно иллюстрирует процесс самозащиты фототиристора. На рис. 11а представлены осциллограммы напряжения и тока: этапы быстрого наброса импульса напряжения в прямом направлении, переключения фототиристора при $V_D = 6500$ В и последующего протекания через прибор анодного тока. На рис. 11б приведено ИК-изображение испытываемого прибора в момент срабатывания самозащиты, на котором четко видно место расположения локального участка с пониженным напряжением лавинного пробоя («горячая» точка в центре выпрямительного элемента фототиристора).

Параметры и характеристики фототиристора

Основные параметры и характеристики разработанных фототиристора приведены в таблице. Самый мощный из этой серии приборов — фототиристор ТФ183-2000, выполненный в металлокерамическом корпусе диаметром 120 мм, высотой 35 мм.

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, с другой стороны — с необходимостью обеспечения высоких значений (dV_D/dt) _{crit} и положительной температурной зависимости напряжения переключения. Разработанные тиристоры реально управляются оптической мощностью не более 20 мВт и выдерживают (dV_D/dt) _{crit} = 5000 В/мкс.

На рис. 12–16 представлены типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) во включенном состоянии и блокирующие ВАХ фототиристора ТФ183-2000, а также зависимость токов утечки от температуры при

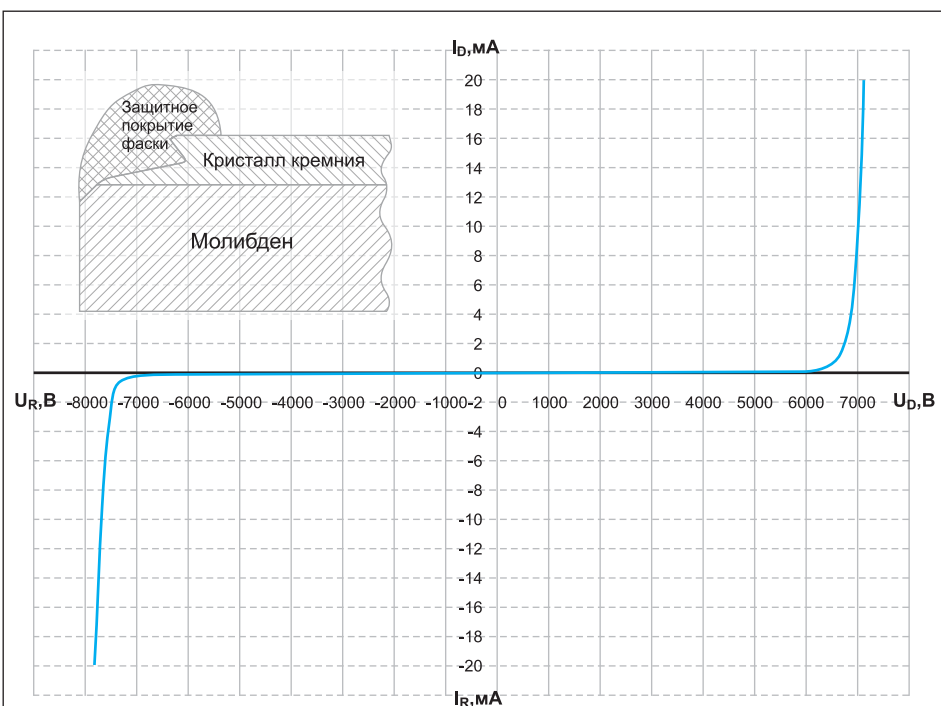


Рис. 12. Блокирующие ВАХ фототиристора ТФ183-2000 с краевым профилем типа НЛХ при комнатной температуре

Таблица. Основные параметры и характеристики фототириستоров

Параметр	Условное обозначение	Значение		
		ТФ353-630	ТФ173-1000	ТФ183-2000
Напряжение переключения, В	V_{BO}	6500	6500	6500
Повторяющееся импульсное обратное напряжение, В	V_{RRM}	7000	7000	7000
Повторяющийся импульсный ток в закрытом состоянии/ Повторяющийся импульсный обратный ток, мА	I_{DRM}/I_{RRM}	150	200	250
Максимально допустимый средний ток в открытом состоянии при температуре корпуса $T_C = 70^\circ C$, А	$I_{T(AV)}$	773	1406	2268
Ударный ток в открытом состоянии, кА	I_{TSM}	12	24	40
Критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии, А/мкс	$(di_T/dt)_{crit}$	300	300	300
Критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии, В/мкс	$(dV_D/dt)_{crit}$	2000	2000	5000
Оптическая мощность управления, мВт	P_{LM}	40	40	40
Температура перехода, $^\circ C$	T_j	-60...+125	-60...+125	-60...+125
Пороговое напряжение, В	$V_{(TO)}$	1,35	1,35	1,15
Динамическое сопротивление, мОм	r_T	1,07	0,55	0,35
Время задержки включения \leq , мкс	t_d	5,0	5,0	4,5
Время выключения (типичное значение), мкс	t_q	500	550	600
Заряд обратного восстановления, мкКл	Q_{rr}	3000	4000	5000
Тепловое сопротивление переход-корпус, $^\circ C/Вт$	R_{thjc}	0,0200	0,0112	0,0072
Масса, кг	w	0,73	1,5	2,0
Усилие сжатия, кН	F	20-26	40-48	60-80

$V_R = 7000$ В, зависимость времени задержки включения от прямого напряжения и оптической мощности управления, зависимость заряда обратного восстановления от скорости спада анодного тока.

Высокие значения и симметричность блокирующих характеристик фототиристора получены за счет использования специальной формы бокового контура кремниевой структуры с двойным положительным углом типа «несимметричный ласточкин хвост» (НЛХ) [8].

К преимуществам разработанных тиристоров по сравнению с существующими аналогами следует отнести то, что они имеют низкие

статические и динамические потери, малый заряд обратного восстановления, высокие значения $(dV_D/dt)_{crit}$ низкие токи утечки.

Разработанные фототиристоры включаются быстрее и при более низком анодном напряжении — практически так же, как и обычные тиристоры ($V_D \geq 2$ В).

Исследования в области создания полупроводниковых ключей, управляемых импульсами света, продолжаются. Они направлены на совершенствование элементов самозащиты, увеличение рабочих токов и напряжений, улучшение импульсных характеристик.

Разработка и освоение производства высоконадежных фототиристоров позволит обе-

спечить комплектацию преобразовательного оборудования электроэнергетики современной полупроводниковой элементной базой и будет способствовать успешному выполнению силами отечественных предприятий плана перспективного развития электрической сети Единой энергетической системы России и Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2020 г., одобренной Правительством РФ распоряжением № 215-р от 22.02.2008 г.

Закключение

Разработаны новые мощные высоковольтные тиристоры типа ТФ353-630, ТФ173-1000, ТФ183-2000 с прямым управлением света (фототиристоры) на токи от 630 до 2000 А, напряжение до 7000 В с интегрированными функциями самозащиты.

Фототиристоры имеют высокий КПД, устойчивы к многократным перегрузкам по току и напряжению, к высокому электромагнитным помехам и другим внешним критическим воздействиям. Электрические параметры и характеристики оптимизированы для работы в сборках с последовательным соединением фототиристоров.

Они найдут широкое применение в отечественных преобразователях нового поколения для высоковольтных передач постоянного тока, компенсации реактивной мощности, управления мощными электродвигателями среднего напряжения (например, для газоконденсаторных станций).

Благодаря оптическому управлению, интегрированным защитным функциям, а также уникальному сочетанию коммутирующих характеристик, фототиристор занимает сегодня достойное место в ряду важнейших компонентов для электрооборудования HVDC, а также для других применений, где требуется пре-

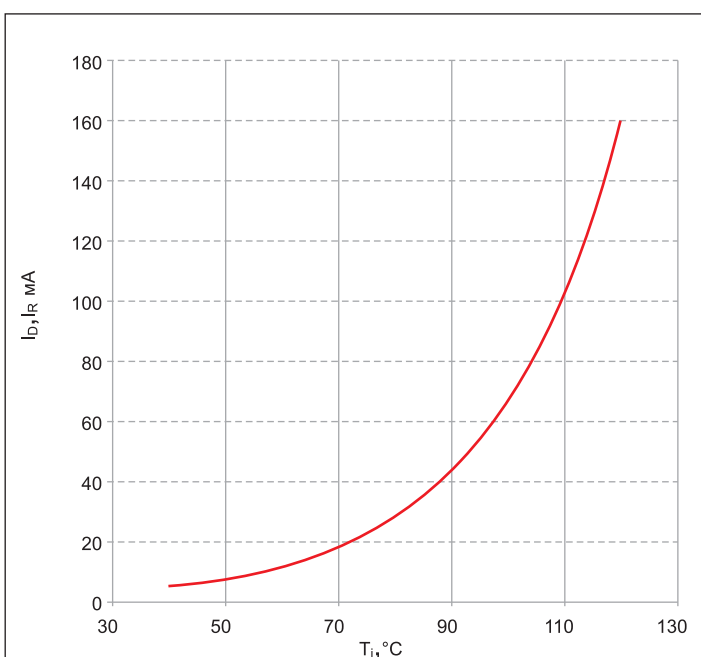


Рис. 13. Зависимость тока утечки фототиристора ТФ183-2000 от температуры

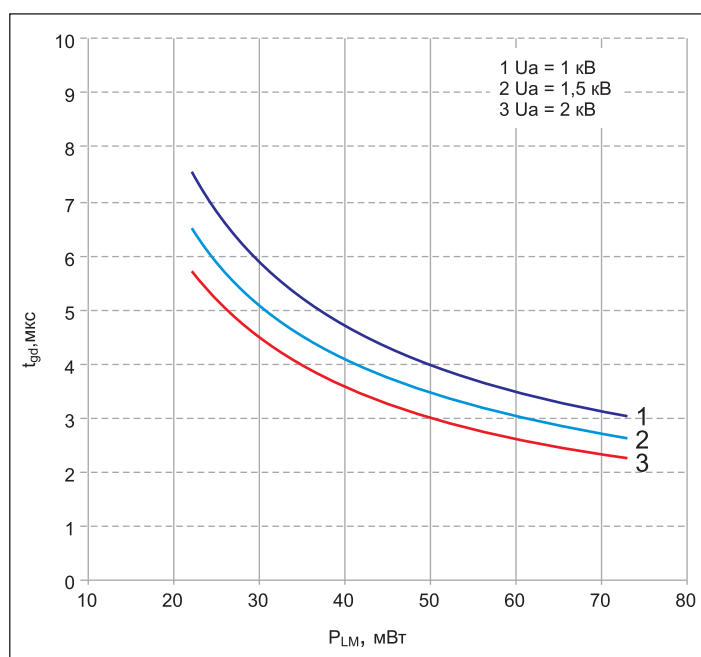
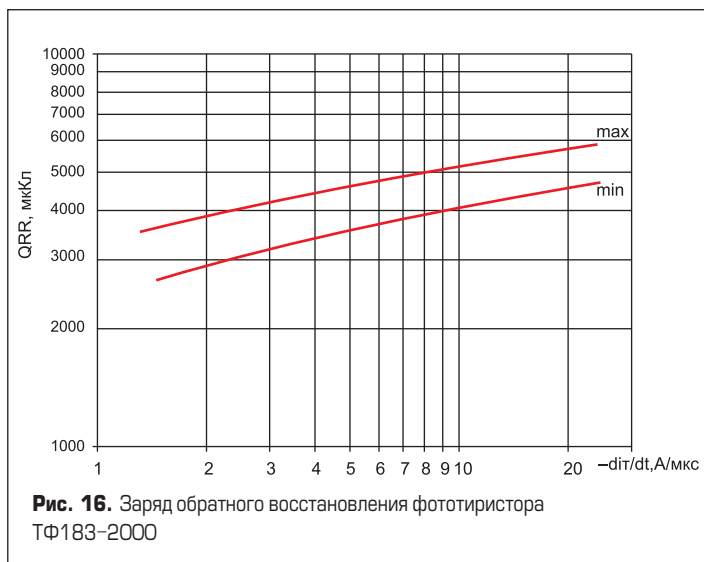
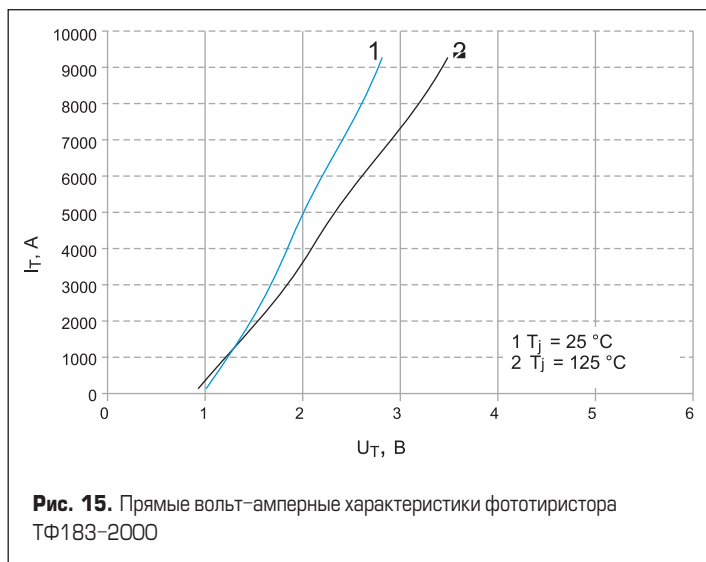


Рис. 14. Зависимость времени задержки включения фототиристора ТФ183-2000 от амплитуды оптической мощности управления и величины анодного напряжения



образование электрической энергии в мега- и гигаваттном диапазоне мощностей.

Авторы благодарят Орната Е.К. за представленные материалы по ИК-поглощению в кремниевых структурах, а также всех остальных коллег из ОАО «Электровыпрямитель» и ФГУП «ВЭИ» за их участие в данной работе.

Литература

1. Dorn J., Kellner U., Niedernostheide F.-J., Schulze H.-J. State of Art Light Triggered Thyristors with Integrated Protection Functions // Power Electronics Europe. 2002. № 2.
2. Przybilla J., Keller R., Schneider C., Schulze H.-J., Niedernostheide F.-J. Advantages in Application Design by using Direct-Light-Triggered Thyristors. www.infineon.com.
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.
4. Przybilla J., Keller R., Kellner U., Schulze H.-J., Niedernostheide F.-J., Peppel T. Direct-Light-Triggered Solid-State Switches for Pulsed Power Application. IEEE. 2003.
5. Jnsen J.-P., Merz W. Light Triggered Thyristor Crowbar for Klystron Protection Application. IEEE. 2003.
6. Мартыненко В. А., Чумаков Г. Д., Хапугин А. А., Конюхов А. В., Веселова И. М., Сурма А. М. Мощные высоковольтные тиристоры с оптическим управлением // Современная электроника. 2008. № 9.
7. Козловский В. В. Модифицирование полупроводников пучками протонов. СПб.: Наука, 2003.
8. А. с. № 1455952 (РФ) Высоковольтный тиристор / П. С. Агаларзаде, Г. С. Бужкина, Э. Й. Куузик, Ю. М. Локтаев, В. А. Мартыненко, Ю. А. Астафьев // 1990.