

Высоковольтные тиристоры с элементами самозащиты

при работе в аварийных режимах

В статье обсуждается возможность формирования встроенных элементов самозащиты от перенапряжения высоковольтных полупроводниковых тиристоров за счет локального протонного облучения области основного управляющего электрода, на основании успешного опробования показаны результаты применения данного решения при разработке нового высоковольтного тиристора Т483-1600-60.

Дмитрий Титушкин

d.titushkin@proton-electrotex.com

Алексей Сурма

a.surma@proton-electrotex.com

Дмитрий Носов

d.nosov@proton-electrotex.com

Игорь Савин

i.savin@proton-electrotex.com

Введение

Современный рынок энергетического оборудования требует применения высоконадежных технических решений и комплектующих, так как отказ силового полупроводникового при эксплуатации может привести к весьма затратному отказу всего преобразовательного оборудования. Применительно к высоковольтным преобразовательным установкам, в состав которых входят силовые полупроводниковые тиристоры (обычно рассчитанные на напряжение порядка 6500 В), отказ драйвера управления силовым тиристором может привести к ситуации, выходящей за область безопасной работы стандартного мощного тиристора, когда тиристор необходимо перевести в проводящее состояние при отсутствии внешнего сигнала управления в связи с отказом драйвера.

Поэтому важным направлением совершенствования конструкций высоковольтных силовых полупроводниковых тиристоров является введение в полупроводниковую структуру элементов самозащиты от перенапряжения [1–6]. Данное решение позволяет исключить отказ высоковольтного тиристора при возникновении несанкционированного режима работы за счет придания тиристорному элементу свойства динистора (переключение в проводящее состояние при подаче определенного значения напряжения катод-анод) [6].

Известно, что протонное облучение вводит в структуру полупроводникового прибора рекомбинационные центры, что позволяет регулировать динамические параметры тиристоров и обычно используется для изготовления быстродействующих и быстросовосстанавливающихся тиристоров и диодов [4]. Кроме того, протонное облучение (имплантация атомов водорода) индуцирует возникновение связанных с ним донорных центров, по свойствам аналогичных традиционным донорам (фосфор, мы-

шьяк, сурьма) [4, 7]. Такое локальное протонное облучение может формировать элементы самозащиты от перенапряжения, при этом с высокой точностью регулируя напряжения лавинного пробоя, что особенно актуально для работы тиристоров в последовательных сборках высоковольтных вентилях [5].

Таким образом, тиристор в составе последовательной сборки может безопасно переключаться при отказе драйвера (отсутствии штатных сигналов управления), и, соответственно, вентиль сохраняет работоспособность при отказе драйвера одного из тиристоров [5].

Экспериментальные образцы

Данное конструктивно-технологическое решение опробовано на тиристорах с диаметром полупроводникового элемента 80 мм, рассчитанных на напряжение 2000 В, где под областью основного управляющего электрода была сформирована n-область при помощи протонного облучения.

В качестве программы исследования было проведено следующее:

- измерение основных электрических параметров и характеристик и сравнение с результатами измерений до формирования элементов самозащиты;
- испытания на безопасное переключение при малых анодных токах (до 35 А);
- испытания на безопасное переключение при анодных токах до 1250 А;
- электрическое воздействие (ударным током) с целью определения стабильности поведения механизма переключения в условиях эксплуатации;
- повторные испытания на безопасное переключение при анодных токах до 1250 А.

Измерение основных электрических параметров и характеристик до и после формирования встроенных элементов самозащиты позволило сделать

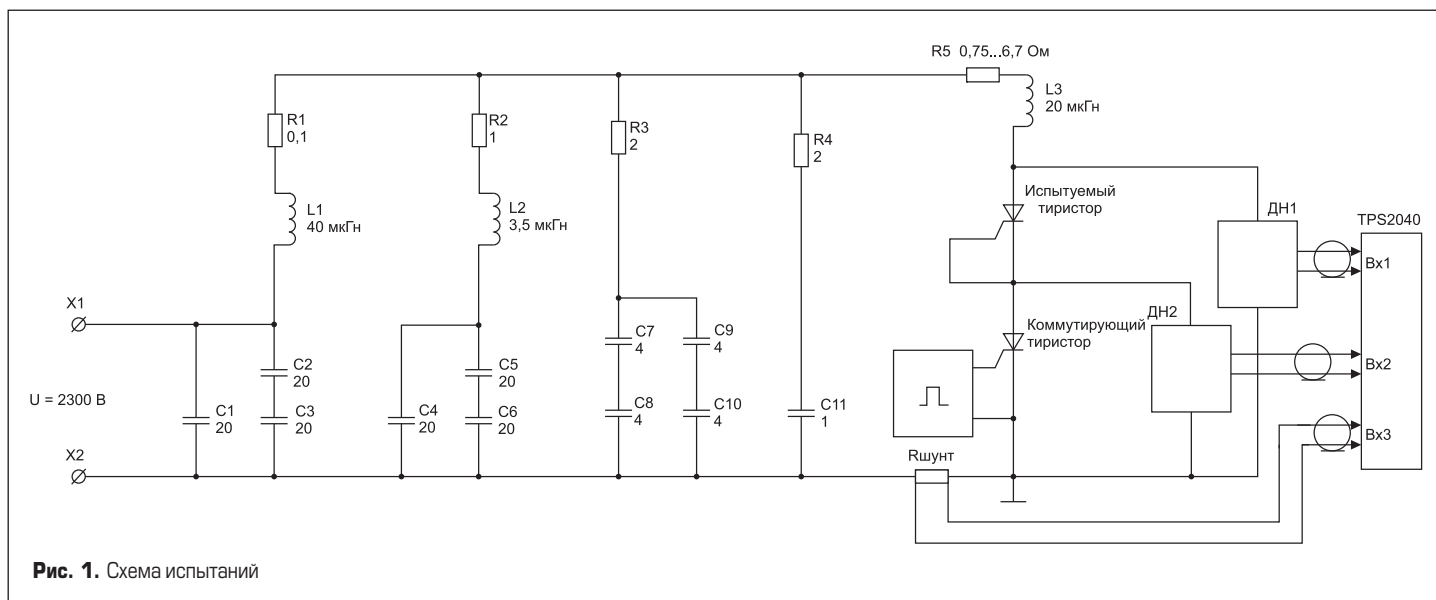


Рис. 1. Схема испытаний

вывод, что введение в структуру тиристора локальной области, отвечающей за переключение в проводящее состояние, не ухудшает основные электрические и тепловые параметры и характеристики испытуемых тиристоров.

Испытания тиристоров с элементами самозащиты на безопасное переключение по аноду заключались в проверке их способности выдерживать воздействие импульсов тока значительной амплитуды при переключении под действием перенапряжений в прямом направлении. Испытания проводились как при разомкнутой, так и при закороченной цепи управления и выполнялись в два этапа.

На первом этапе тиристоры подвергались воздействию перенапряжения в прямом направлении от высоковольтного источника тока, который при переключении испытуемого тиристора формировал импульс тока полусинусоидальной формы длительностью 100 мкс по уровню 0,5 от амплитудного значения. Выходное напряжение холостого хода источника составляло не менее 6 кВ, амплитуда импульса тока устанавливалась равной 35 А. Каждый образец подвергался воздействию пяти импульсов перенапряжения. После испытаний контролировались значения повторяющегося импульсного тока в закрытом состоянии и повторяющегося импульсного обратного тока.

На втором этапе тестируемые образцы подвергались воздействию перенапряжений в схеме, после переключения тиристора обеспечивающей формирование импульса тока трапецидальной формы большой амплитуды с высокой скоростью нарастания переднего фронта.

В жакимное устройство стэнда устанавливались последовательно включенные испытуемый образец, цепь управления которого была либо закорочена, либо разомкнута, и коммутирующий тиристор типа T173-2000-34. При испытаниях использовалась формирующая линия с волновым сопротивлением 1 Ом. До подачи импульса управления коммутирующим тиристором напряжение на каждом из тиристоров примерно равно и составляет половину напряжения на формирующей линии. При включении коммутирующего тиристора все напряжение прикладывается к испытуемому тиристор, и, поскольку его значение превышает напряжение переключения испытуемого тиристора, он переключается. Амплитуда тока задавалась включенными последовательно дополнительными резисторами с сопротивлением 6,7 или 0,75 Ом. Скорость нарастания тока регулировалась включенной последовательно с резистором катушкой индуктивности. Напряжение на формирующей линии перед включением коммутирующего тиристора устанавливалось равным 2300 В. Схема подключения испытуемого тиристора к формирующей линии показана на рис. 1. Напряжение на коммутирующем тиристоре и на двух последовательно включенных тиристорах, коммутирующем и испытуемом, регистрировалось осциллографом TPS2024 и делителями напряжения типа Tektronix P5100. Осциллограмма напряжения на испытуемом тиристоре с самозащитой получена методом дифференциального измерения. Осциллограммы напряжения на испытуемом образце и тока через него представлены на рис. 2–6.

При сопротивлении нагрузки 6,7 Ом амплитуда тока составляла 290 А, скорость нарастания переднего фронта по уровню 0,5 равна 75 А/мкс, длительность импульса по уровню 0,5 — 350 мкс. Количество воздействий на каждый образец — 300 импульсов с частотой 1 Гц.

При сопротивлении нагрузки 0,75 Ом амплитуда тока составляла 1250 А, скорость нарастания переднего фронта по уровню 0,5 равна 90 А/мкс, длительность импульса по уровню 0,5 — 125 мкс. Количество воздействий на каждый образец — 120 импульсов с частотой 1 Гц.

В результате тиристоры выдержали испытания на безопасное переключение, то есть на токах до 1250 А механизм самозащиты при переключении под воздействием перенапряжения сработал (рис. 2–6). Стойкость тиристоров к воздействию скорости нарастания тока в открытом состоянии при переключении по аноду у исследуемых образцов сопоставима с типичными значениями di/dt стойкости при включении тиристоров по управляющему электроду.

Для проверки возможности отжига эффекта локального облучения (в аварийных режимах работы тиристора) были проведены испытания в режиме высокотемпературного хранения при температуре +125 °С в течение 168 ч и испытания на стойкость к воздействию 20 последовательных импульсов ударного тока амплитудой 40 кА при $T = 125$ и $V_D = V_R = 0$. После чего были измерены параметры-критерии годности и проведено повторное испытание на переключение тиристора со встроенным механизмом самозащиты от воздействия перенапряжения при токе 1250 А. В результате испытаний не наблюдалось изменения

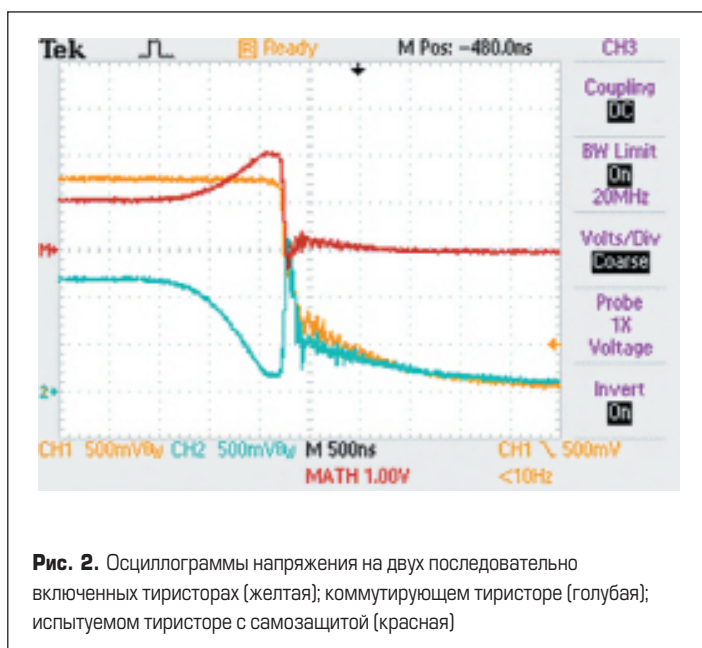


Рис. 2. Осциллограммы напряжения на двух последовательно включенных тиристорах (желтая); коммутирующем тиристоре (голубая); испытуемом тиристоре с самозащитой (красная)

значений напряжения переключения тиристорov в прямом направлении и не было обнаружено параметрических и катастрофических отказов.

Разработка нового высоковольтного тиристора со встроенными элементами самозащиты от перенапряжения

На основании полученного опыта при проведении эксперимента по формированию встроенных элементов самозащиты от перенапряжения было принято решение о разработке мощного высоковольтного тиристора T483-1600-60, который характеризуется:

- оптимизированной диффузионной структурой и применением технологии низкотемпературного спекания для снижения динамического сопротивления (r_T);
- модернизированной топологией диффузионного элемента и применением протонного облучения для получения малых (до 400 мкс) значений времени выключения тиристора;
- прецизионным регулированием значений заряда обратного восстановления (Q_{RR}) до уровня $\pm 5\%$;
- интегрированным элементом самозащиты от перенапряжения, что исключает необходимость применения таких технических решений, как установка внешних ограничителей напряжения (BOD), и, соответственно, устраняет необходимость доработки конструкции силового блока для применения систем защиты.

Данное решение позволит снизить сложность силовой сборки и нивелировать связанные с этим риски, при сопоставимом с применением внешних элементов защиты уровне затрат. Дополнительно на выходных испытаниях АО «Протон-Электротекс» планирует проверку работы интегрированной системы защиты в составе тиристора, то есть

Таблица. Основные параметры и характеристики высоковольтного тиристора T483-1600-60

Параметр	Норма	Условия измерений
V_{DRM}/V_{RRM}	6000 В	$-60^{\circ}\text{C} < T_j < 125^{\circ}\text{C}$
I_{TAV}	1600 А	$T_c = 98^{\circ}\text{C}$; двухстороннее охлаждение
I_{Tsm}	40 кА	$T_j = 125^{\circ}\text{C}$, ($t_p = 10 \mu\text{s}$); единичный импульс; $V_D = V_R = 0 \text{ В}$
$(dV_D/dt)_{CRIT}$	2500 В/мкс	$T_j = 125^{\circ}\text{C}$; $V_D = 4000 \text{ В}$; управление разомкнуто
V_{TM}	2,4 В	$T_j = 25^{\circ}\text{C}$; $I_{TM} = 5024 \text{ А}$
V_{TM}	2,1 В	$T_j = 125^{\circ}\text{C}$; $I_{TM} = 2500 \text{ А}$
tg δ	2,0 мкс	$T_j = 25^{\circ}\text{C}$; $V_D = 600 \text{ В}$; $I_{TM} = 1600 \text{ А}$;
tq	400 мкс	$dV_D/dt = 50 \text{ В/мкс}$; $T_j = 125^{\circ}\text{C}$; $I_{TM} = 1600 \text{ А}$; $di_D/dt = -5 \text{ А/мкс}$; $V_R \geq 100 \text{ В}$; $V_D = 4000 \text{ В}$;
Q_{RR}	3500 мкКл	$T_j = 125^{\circ}\text{C}$; $I_{TM} = 1600 \text{ А}$; $di_R/dt = -5 \text{ А/мкс}$; $V_R \geq 100 \text{ В}$
R_{thjc}	0,0075 $^{\circ}\text{C/Вт}$	Двухстороннее охлаждение

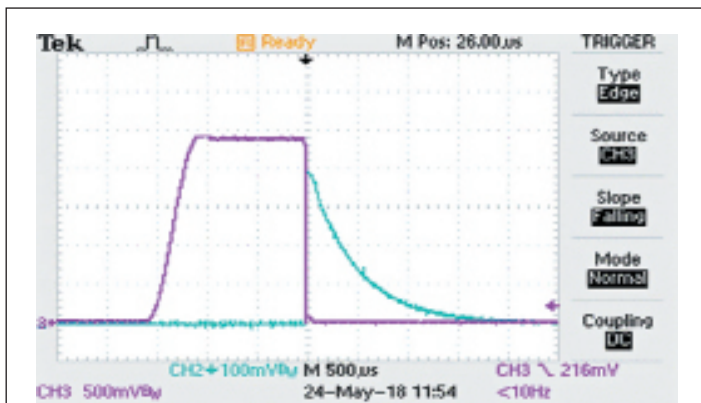


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на двух последовательно включенных тиристорах (фиолетовая) и тока через испытуемый тиристор с самозащитой (голубая) при амплитуде тока 290 А

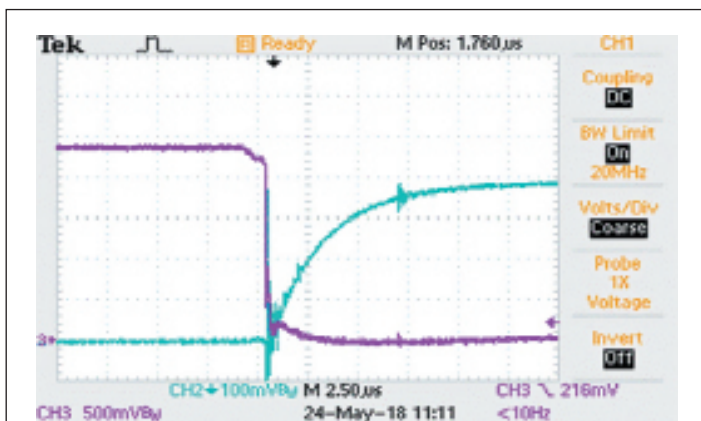


Рис. 4. Осциллограммы напряжения на двух последовательно включенных тиристорах (фиолетовая) и переднего фронта тока через испытуемый тиристор с самозащитой (голубая) при амплитуде тока 290 А



Рис. 5. Осциллограммы напряжения на двух последовательно включенных тиристорах (фиолетовая) и тока через испытуемый тиристор с самозащитой (голубая) при амплитуде тока 1250 А



Рис. 6. Осциллограммы напряжения на двух последовательно включенных тиристорах (фиолетовая) и переднего фронта тока через испытуемый тиристор с самозащитой (голубая) при амплитуде тока 1250 А

с точки зрения потребителя будет аттестован не только сам прибор, но и система защиты, входящая в структуру прибора, что невозможно сделать при использовании компонентов по отдельности.

Основные параметры и характеристики разрабатываемого тиристора сведены в таблицу.

Вывод

Был успешно опробован интегрированный механизм самозащиты от перенапряжения, полученный локальным облучением области управляющего электрода основного тиристора, и доказана стабильность работы данного механизма в условиях тепловых и электрических воздействий. Полученные результаты дали предпосылки для разработки нового высоковольтного тиристора Т483-1600-60 со встроенными элементами самозащиты в случае отказа драйвера управления, что облегчает конструкцию силовых преобразователей и снижает вероятность отказа из-за увеличения количества применяемых элементов системы.

Литература

1. Niedernostheide F.-J., Schulze H.-J., Kellner-Werdehausen U. Self-protected high-power thyristors. Power Conversion, Nuernberg. Proc. PCIM 2001.
2. Dr. Barthelmess R., Keller-Werdehausen U., Dr. Niedernostheide F.-J., Dr. Schulze H.-J. Adjustment method for a thyristor's reverse breakdown voltage uses negative- and positive-doped bases, a collector and an emitter along with hydrogen-induced donors. (Infineon Technologies AG EUPEC GmbH (Infineon Technologies Bipolar GmbH and Co KG.) Патент DE10344592B4; заявлено 25.09.2003; опубл. 19.05.2005.
3. Дерменжи П. Г. Способ регулирования напряжения переключения силового полупроводникового прибора. Патент RU2474926C1; заявлено 21.09.2011; опубл. 10.02.2013.
4. Губарев В. Н., Семенов А. Ю., Столбунов В. С., Сурма А. М. Технология протонного облучения и возможности ее применения для улучшения характеристик силовых диодов и тиристоров // Силавая электроника. 2011. № 5.
5. Дерменжи П. Г., Локтаев Ю. М., Сурма А.М., Черников А. А. Новые высоковольтные мощные тиристоры со встроенными в полупроводниковую структуру элементами защиты в аварийных режимах // Силавая электроника. 2012. № 1.
6. Loktaev Y.M., Surma A.M., Chernikov A.A. -New high-voltage power thyristor with built-in protective elements in the semiconductor structure in case of emergency mode[^] excess-voltage protection Bodo's Power Systems 2011, No. 11.
7. Козловский В. В. Модифицирование полупроводников пучками протонов. М.: Наука, 2003.