## Новые высоковольтные мощные тиристоры со встроенными в полупроводниковую структуру элементами защиты в аварийных режимах

Дерменжи П. Г., Локтаев Ю. М., Сурма А.М., Черников А. А



Несмотря на значительное развитие преобразовательной техники на базе полностью управляемых полупроводниковых ключей (IGBT, GTO, IGCT), для ряда областей применения, особенно в высокомощной и высоковольтной силовой электронике, по – прежнему, технически оправданным и востребованным остается применение «традиционных» мощных тиристоров.

Основные тенденции развития этого типа силовых полупроводниковых приборов можно охарактеризовать следующим образом.

Увеличение максимальной мощности, коммутируемой отдельным прибором. Освоен диапазон блокируемых напряжений до 8000В, с реальной перспективой его расширения до 12000В. Освоен диапазон до 3000А по среднему току отдельного тиристора, что соответствует диаметру отдельного кремниевого тиристорного элемента 100 - 150мм.

Устойчивая рыночная ниша высоковольтных сильноточных приборов для работы на промышленной частоте.

Рост требований по надежности и ресурсу. Ведущие фирмы, начинают сравнивать гарантированный ресурс работы мощных тиристоров с ресурсом работы электровозов, трансформаторов, дуговых электропечей и других объектов, где тиристоры находят применение. Стандартным требованием к прибору становится термодинамическая устойчивость корпуса.

Важным направлением совершенствования конструкции мощных тиристоров, которое позволяет увеличить их надежность, является применение элементов самозащиты, интегрируемых в кремниевую структуру тиристорного элемента [1], что позволяет исключить выход из строя при возникновении несанкционированного режима работы.

К таким режимам, выходящим за пределы области безопасной работы и, поэтому, недопустимых при эксплуатации обычных тиристоров, следует, в частности, отнести включение мощных тиристоров в т.н. «динисторных» режимах (без внешнего сигнала управления), а именно, путем приложения в прямом направлении:

Перенапряжений (импульсов напряжения, нарастающих со скоростями ниже критической скорости);

Импульсов напряжения, нарастающих со скоростями выше критической скорости;

Импульсов прямого напряжения до завершения процесса восстановления запирающих свойств (время задержки импульса прямого напряжения после окончания имульса анодного тока меньше времени выключения t < tq).

Переключение тиристора в указанных режимах происходит обычно в пределах локальной области малой площади, при этом, т.к. расширение включенной площади происходит достаточно медленно, то импульс тока с амплитудой даже много меньшей среднего тока тиристора может привести к необратимой деградации полупроводниковой структуры.

Если для 1-го и 2-го режимов, указанных выше, защита может быть достаточно эффективно осуществлена с помощью внешних элементов в составе схемы управления (драйвера), то для третьего режима это весьма затруднительно, т.к. реальное время выключения тиристора зависит от многих фак-



торов, изменяющихся в процессе функционирования тиристора в аппаратуре (температура полупроводниковой структуры, амплитуд анодного тока и напряжения и скоростей изменения этих величин при выключении). При этом опасным для тиристора является обычно довольно узкий временной интервал времени задержки импульса прямого напряжения, когда это время задержки близко к реальному значению времени выключения, но меньше его. В течение этого «опасного» интервала первоначальное включение тиристора в нештатном режиме происходит в пределах локальной области с малой площадью, вследствие чего возможен его выход из строя при нарастании «аварийного» анодного тока, рис.1.

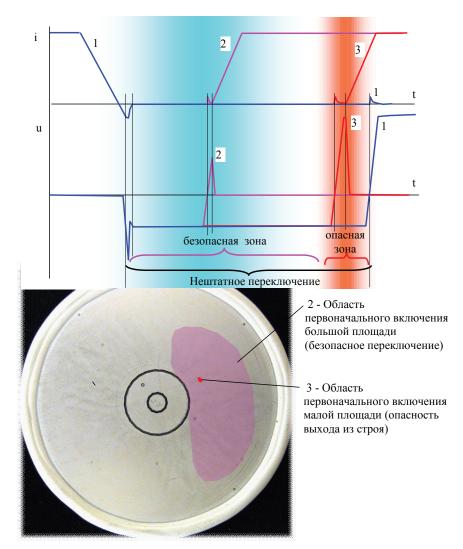


Рис. 1. Зависимости анодного тока и напряжения от времени в процессе нештатного переключения при подаче импульса прямого напряжения до завершения процесса восстановления запирающих свойств. 1 - «штатный» процесс выключения (t> tq), аварийное переключение не происходит; 2 - аварийное переключение в «безопасной» зоне, область первоначального



включения имеет большую площадь и периметр; 3 - аварийное переключение в «опасной» зоне, область первоначального включения имеет малую площадь и периметр.

Несмотря на кажущуюся малую вероятность неблагоприятного развития аварийной ситуации, проблема защиты мощных тиристоров от пробоя в описанном режиме весьма актуальна. Так в [2] был проведен анализ отказов тиристоров при их работе в высоковольтной преобразовательной аппаратуре Выборгской вставки постоянного тока, где одновременно эксплуатируется 6 тысяч тиристоров Т273-1250 42 класса. Было показано, что более половины отказов может быть интерпретированы, как следствие развития аварийной ситуации при приложении «нештатного» импульса прямого напряжения к тиристору до завершения процесса восстановления его запирающих свойств. Аналогичные результаты были получены при анализе отказов тиристоров Т453-500 40 класса и ТБ853-800 22 класса в процессе отработки и эксплуатации преобразователя электропоезда «ЭТ2А» с асинхронным приводом.

Задача создания тиристора с защитой от выхода из строя в описанном режиме сводится к обеспечению достаточного периметра области первоначального включения при любых режимах нештатного переключения. Если принять, что кондиции изменения анодного тока на переднем фронте при аварийном переключении не превышают допустимых пределов для «штатного» включения при подаче импульса тока управления, то периметр области первоначального включения при нештатном переключении должен быть не меньше, чем периметр управляющего электрода (УЭ) тиристора (или суммы периметров УЭ вспомогательного и основного тиристоров, если используется вспомогательная тиристорная структура). Для того, чтобы гарантировать контролируемую конфигурацию области первоначального включения в нештатном режиме применяются различные конструктивно-технологические мероприятия:

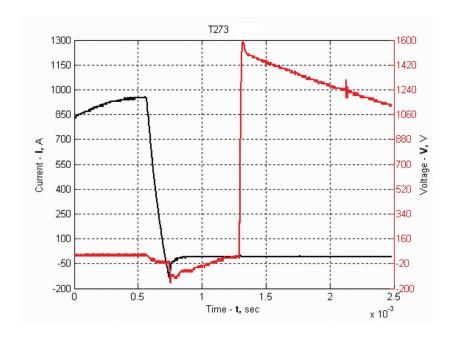
- комплекс технологических мер, направленных на достижение равномерного по площади тиристорной полупроводниковой структуры исходного распределения таких величин, как время жизни носителей заряда в базовых и эмиттерных слоях, слоевого сопротивления р- базы и др., что позволяет исключить появление «неконтролируемой» локальной области первоначального включения в нештатном режиме;
- создание локальной области (или группы областей) с контролируемой конфигурацией, в пределах которой время выключения больше, чем в других областях тиристорной структуры, при нештатном переключении эта область (или группа областей) гарантированно будут переключаться первыми и обеспечат необходимый периметр области первоначального включения. В качестве методов получения таких областей могут быть использованы создание локальных по площади областей пониженной рекомбинации в n-базовом слое, локальные области с уменьшенной эффективностью распределенной катодной шунтировки и др.;
- комплекс мер, позволяющих в любом случае получить конфигурацию области первоначального включения, соответствующую проектируемой.



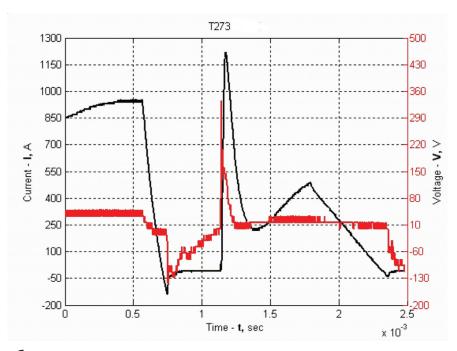
Сегодня для обеспечения требуемого периметра области первоначального включения используются методы создания областей с «градиентным» распределением «локального» времени выключения (при этом площадь области первоначального включения может изменяться, но ее периметр меняется слабо), а также различные конструктивно-технологические методы, использующие «передачу» включения на область вблизи управляющего электрода.

Применение описанных конструктивно-технологических мероприятий позволило разработать и применить в массовом производстве технологию изготовления тиристоров, обладающих стойкостью к несанкционированному переключению в режиме с приложением импульсов прямого напряжения до завершения процесса восстановления запирающих свойств [3].

В настоящее время ЗАО «Протон-Электротекс» производит серию тиристоров, стойких к аварийному переключению при неполном восстановлении запирающей способности, предназначенных для комплектации устройств электроэнергетики и транспорта. Эти приборы способны безопасно переключаться в таком режиме и коммутировать импульсы аварийного тока ITM(tq) амплитудой не менее оговоренного паспортного значения. Типичные осциллограммы тока и напряжения при переключении такого тиристора в процессе его тестирования приведены на рис. 2. Основные характеристики новых приборов приведены в таблице 1.



a.



б.

Рис. 2. Типичные осциллограммы тока и напряжения при переключении тиристора, стойкого к аварийному переключению при неполном восстановлении запирающей способности, в процессе его тестирования: а. – тиристор не переключается (время задержки подачи импульса прямого напряжения больше времени выключения tq), б. – переключение тиристора в «опасной» зоне (время задержки подачи импульса прямого напряжения близко к значению времени выключения tq, но меньше его).



Таблица 1.

Параметр и единица измерения	Буквенное обозначение	Тип прибора (новые разработки)		
		T453C-800	T273C-1250	T173C-1600
Повторяющееся импульсное	$U_{DRM}$	2400-3200	4200-4400	3600-4000
напряжение в закрытом состоянии и	$U_{RRM}$			
повторяющееся импульсное				
обратное напряжение, В				
Максимально допустимый средний	$I_{T(AV)}$	800(85°C)	1250(85°C)	1600(85°C)
прямой ток, А				
Импульсный аварийный прямой	$I_{TM(tq)}$	800	1250	1600
ток, А (при t≤t <sub>q</sub> )				
Ударный неповторяющийся ток в	$I_{TSM}$	15	33	36
открытом состоянии, кА				
Критическая скорость нарастания	$(di_T/dt)_{crit}$	630	250	250
тока в открытом состоянии, А/мкс				
Температура перехода, °С				
-максимально допустимая	$T_{jm}$	+125	+125	+125
-минимально допустимая	$T_{jmin}$	-60	-60	-60
Импульсное напряжение в	$U_{TM}$	2,3	2,1(3925A)	2,05
открытом состоянии, В, не более				
Повторяющийся импульсный ток в	$I_{DRM}$	100	150	150
закрытом состоянии и	$I_{RRM}$			
повторяющийся импульсный				
обратный ток, мА, не более				
Отпирающее постоянное	$U_{GT}$	5,0	3,0	3,0
напряжение управления, В, не более				
Отпирающий постоянный ток	$I_{GT}$	0,40	0,3	0,30
управления, А, не более				
Гарантированный ресурс, лет		15	15	15
Время выключения, мкс, не более	$t_q$	160-250	250-500	250-500
Время выключения при $U_R=0$ , мкс,	$t_{q0}$	1,2t <sub>q</sub>	$1,2t_q$	1,2t <sub>q</sub>
не более		•	•	,
Критическая скорость нарастания	$(dU_D/dt)_{crit}$	1600	1000-1600	1000-1600
напряжения в закрытом состоянии,				
В/мкс, не менее				
Тепловое сопротивление переход-	$R_{thjc}$	0,02	0,01	0,01
корпус, °С/Вт, не более	<u> </u>			
Габаритные размеры корпуса				
-высота, мм		26	26	26
-диаметр, мм		75	107	107
Масса, кг	M	0,5	1,2	1,2



## **ЛИТЕРАТУРА**

Niedernostheide F.-J., Schulze H.-J., Kellner-Werdehausen U. Self-protected high-power thyristors. - Proc. PCIM 2001, Power Conversion, Nuernberg, p.51-56.

Лазарев Н.С., Локтаев Ю.М., Лытаев Р.А., Конюхов А.В., Чесноков Ю. А., Прочан Г.Г. Оценка состояния тиристоров Т373-1250 в блоках БВПМ 800/120 на Выборгской подстанции. - Известия НИИ постоянного тока, С.-Петербург, 2004, N2 60, c.98-119.

Дерменжи П.Г., Конюхов А.В., Лапшина И.Н., Локтаев Ю.М., Чесноков Ю. А., Черников А.А. К вопросу о расширении областей безопасной работы мощных тиристоров. – Тез. докладов конф. «Современное состояние развития приборов силовой электроники и преобразовательной техники», 2004, Саранск, изд. ОАО «Электровыпрямитель», с. 15-16.