

# Применение оптотиристоров в преобразовательных устройствах с фазовым регулированием

Одновременное воздействие температуры, тока управления и обратного напряжения на тиристоры с выведенным управляющим электродом обычных конструкций вызывает синергетический эффект резкого возрастания обратных токов утечек через прибор, что в реальном работающем устройстве ведет к выходу его из строя. Силовые оптотиристоры могут наиболее эффективно использоваться в преобразовательных системах с фазовым управлением и регулированием. Повышенная помехоустойчивость и тепловая стабильность свойств оптронных тиристоров относятся к их потенциальным преимуществам. Рекомендации настоящей статьи применимы к устройствам на опто- и фототиристорах и обычных тиристорах с управляющим электродом.

Евгений СИЛКИН,  
к. т. н.  
elsi-mail@ya.ru

Обычные однооперационные тиристоры (SCR) являются одним из старейших классов «твердотельных» управляемых статических ключей, который, однако, не превзойден по показателям надежности и эффективности при использовании в преобразовательных устройствах различного назначения.

Несмотря на интенсивное развитие и относительно многообразие современных силовых электронных приборов, SCR продолжают уверенно занимать свою нишу в силовой электронике, в первую очередь, в технике больших и сверхбольших мощностей.

Тиристоры условно разделяются на симметричные и асимметричные. В подавляющем большинстве применений полупроводниковый прибор должен выдерживать обрат-

ное напряжение и иметь симметричную или квазисимметричную вольт-амперную характеристику в выключенном состоянии. К таким применениям относятся самые массовые и энергоемкие устройства современной силовой электроники — преобразователи и регуляторы с фазовым управлением, например регулируемые выпрямители [1–3]. Асимметричные тиристоры используются лишь в сравнительно ограниченном ряде преобразовательных систем, где от прибора не требуется блокирующей способности в обратном направлении.

Оптронные SCR представляют собой специальный тип симметричных полупроводниковых силовых приборов, которые могут наиболее эффективно использоваться в преобразовательных устройствах с фазовым

управлением. Оптотиристор — это полупроводниковая сборка [4], которая состоит из двух элементов, объединенных в одну конструкцию: силового кремниевого (Si) фототиристора и управляющего светодиода малой мощности на основе арсенида галлия (GaAs). Оптическая развязка силовой и информационной частей позволяет не только упростить управление таким тиристором, но и значительно повышает помехоустойчивость преобразователей большой мощности и систем автоматического управления на их основе, в частности, высоковольтных систем. Управляющие драйверы для приборов с развязкой по оптическому каналу, как правило, имеют более простое устройство и меньшую мощность по сравнению с драйверами обычных тиристоров с выведенным электродом управления.

Необходимая для переключения фототиристора мощность светового потока зависит от глубины залегания переходов под поверхностью кристалла, скорости поверхностной и объемной рекомбинации носителей зарядов и возрастает с увеличением длины волны. Эффективность фотогенерации носителей определяется не только спектром излучения используемого светодиода, но и конструктивными особенностями прибора: диаграммой направленности; углами и местом падения пучка излучения; соотношением площади оптического окна и общей площади кристалла; устройством светового канала и свойствами используемых материалов.

Структура фототиристора практически ничем не отличается от структуры обычного тиристора с управляющим электродом, за исключением возможного изменения глубин

Таблица 1. Паспортные электрические параметры силовых оптотиристорных модулей

Параметр	Тип прибора			
	5П103ТТ-100 (ЗАО «Протон-Импульс», Россия)	МТОТО-160 (ОАО «Оptron-Ставрополь», Россия)	МТОТО9 /3-250 (ООО «Элемент-Преобразователь», Украина)	СмМТОТО-1000 (ОАО «КЭТЗ Диод», Киргизия)
$U_{DRM}/U_{RRM}$ , В	800–1200	400–1600	400–1600	400–2400
$U_{DSM}/U_{RSM}$ , В	900–1300	450–1800	450–1800	450–2640
$I_{T(AV)}$ , А	100	160	250	1000
$I_{TSM}$ , кА	1,50 (10 мс)	3,20 (10 мс)	6,00 (10 мс)	24,0 (10 мс)
$U_{IZ}$ , кВ	2,84	2,50	2,50	2,50
$U_{TM}$ , В	1,75	2,00	1,65 (785 А)	2,00 (3100 А)
$I_{DRM}/I_{RRM}$ , МА	6/6 (125 °С)	15/15(100 °С)	20/20 (100 °С)	50/50 (125 °С)
$(di_{up}/dt)_{crit}$ , В/мкс	100	1000	50–1000	20–1000
$(di_{p}/dt)_{crit}$ , А/мкс	160	70	—	200
$I_{GT}$ , МА	60 (25 °С)	80	80 (25 °С)	250 (25 °С)
$I_{STM}$ , МА	—	250	250	300
$U_{GT}$ , В	1,6	2,5	1,8	—
$U_{GD}$ , В	0,80	0,90	0,9	—
$t_{gr}$ , мкс	150	100	—	—
$T_{JM}$	125	100	100	125
$R_{thjcr}$ °С/Вт	0,30	0,15	0,105	0,035
$W$ , кг	0,14	0,50	0,30	4,15

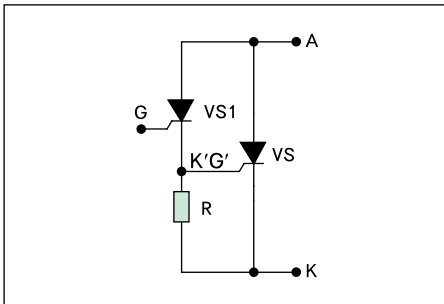


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема тиристора с регенеративным управляющим электродом

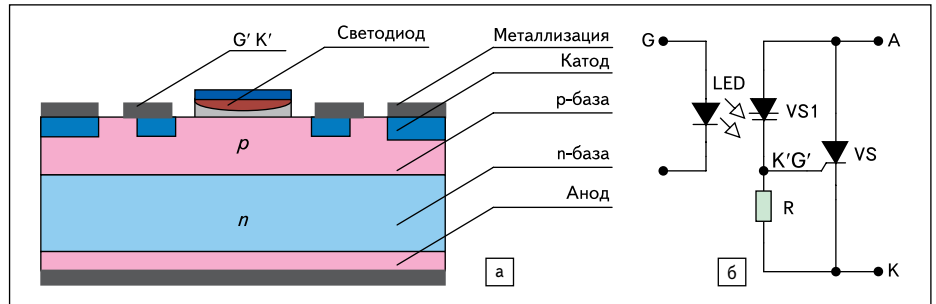


Рис. 2. Силовой оптотиристор с регенеративным управляющим электродом: а) упрощенная структура; б) эквивалентная электрическая схема

залегания и степени легирования отдельных слоев для снижения, например, величины требуемого заряда управления. В настоящее время доступны дискретные низкочастотные приборы и оптотиристорные модули на токи до 1 кА и напряжения до 2,4 кВ, что позволяет создавать управляемые устройства с выходной мощностью в несколько мегаватт (для напряжений стандартных промышленных сетей 50, 60 и 400 Гц). Ведутся также разработки быстродействующих оптронных тиристоров на рабочие частоты выше 500 Гц. Достигнутый уровень серийных промышленных разработок отражает таблица 1 (здесь и далее используется стандартная система условных обозначений параметров [4, 5] тиристоров) [6–9].

В статье [11] проанализировано поведение структур SCR на средние токи при одновременном воздействии сигнала управления ( $i_{FG} \neq 0$ ) и обратного напряжения ( $U_R \neq 0$ ).

Для полноты исследования необходимо рассмотреть еще один вопрос. Тиристоры на большие токи и с большими диаметрами кристаллов, как правило, выполняются со встроенным в основную структуру дополнительным усилителем тока управления, так как для равномерного и быстрого включения всей полупроводниковой структуры необходимо обеспечить соответствующую его величину. Усовершенствование фактически состоит в интеграции вспомогательного маломощного тиристора между управляющим электродом и анодом основного силового тиристора. Такие приборы получили название «тиристоры с регенеративным управляющим электродом». Кроме того, часто в мощных приборах выполняют специальную шунтировку путем металлизации части поверхности тонкой базы, что позволяет повысить стойкость прибора к повышенной скорости нарастания напряжения  $du_D/dt$  в прямом направлении. Схематически это представляется включением между управляющим электродом тиристора и его катодом «резистора» заданной величины (рис. 1). На самом деле указанный резистор является распределенным элементом. Для фототиристора структура с регенеративным управляющим электродом изображена на рис. 2. На этом же рисунке дана и его эквивалентная электрическая схема. На рис. 1, 2



Рис. 3. Внешний вид структур фототиристоров модулей M2TOTO-80-12 и M2TOTO-80-12\*

катод вспомогательного тиристора обозначен как  $K'$ , а управляющий электрод основного тиристора как  $G'$ . Управляющий электрод  $G'$  основного силового тиристора находится внутри корпуса, и к нему нет доступа извне прибора.

Исследованные в упомянутой выше статье [11] оптотиристоры на ток  $I_{T(AV)} = 80$  А имели кристаллы без встроенного дополнительного усилителя тока управления, то есть конструкцию с так называемым обычным управляющим электродом. Однако приборы, например, типа M2TOTO-80 (TO242-80) серийно выпускаются в двух модификациях: с обычным и регенеративным электродом управления. На рис. 3, для сравнения, представлены обе конструкции кристаллов фототиристоров — M2TOTO-80 (TO242-80)

и M2TOTO-80\* (TO242-80\*). Видно, что площадь оптического окна структуры с регенеративным управляющим электродом несколько меньше по величине, чем для такого же прибора без усиления сигнала управления. Так как общая площадь кристалла данного оптотиристора сравнительно мала, регенеративный электрод имеет форму простого кольца.

Результаты измерений токов утечек  $I_{RRM}$  в различных режимах для модификации приборов M2TOTO-80-12\* с регенеративным управляющим электродом представлены в таблице 2. Здесь же приведены данные на мощные оптотиристорные модули M2TOTO9/3-250-16 [8] и обычный высоковольтный тиристор с регенеративным управляющим электродом типа T353-800-32 [10].

Характер зависимостей для тиристоры с регенеративным электродом, в общем, не изменяется. Однако из данных таблицы 2 следует, что конструкция с регенеративным управляющим электродом, кроме известных, и здесь имеет преимущества. Наличие распределенного шунтирующего резистора, снижение необходимого для включения структуры заряда и его относительная локализация существенно ограничивают обратные токи утечек  $I_{RRM}$ .

Для модулей M2TOTO-80-12\* отпирающие постоянные токи ( $I_{GT}$ ) управления остались на уровне токов обычных приборов без усиления сигнала управления (M2TOTO-80-12), что обусловлено уменьшением эквивалент-

Таблица 2. Результаты испытаний оптотиристорных модулей с регенеративным управляющим электродом

Параметр	Тип и № прибора										
	M2TOTO-80-12*						M2TOTO9/3-250-16				T353-800-32
	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2	1.1	1.2	2.1	2.2	
$U_{DRM}^*, U_{RRM}^*, В$	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1600	1600	1600	1600	3200
$I_{T(AV)}^*, А$	80	80	80	80	80	80	250	250	250	250	800
$I_{DRM}^*, I_{RRM}^* (T_j = 125^\circ C), mA$	15	15	15	15	15	15	20	20	20	20	70
$I_{GT}^* (T_j = 25^\circ C), mA$	100	100	100	100	100	100	80	80	80	80	250
$I_{RRM} (T_j = 25^\circ C, i_{FG} = 0 mA), \mu A$	1,3	1,7	1,2	3,1	1,1	1,3	3,5	3,0	2,7	2,7	3,2
$I_{RRM} (T_j = 25^\circ C, i_{FG} = 30 mA), mA$	4,5	5,0	6,0	6,0	4,0	5,0	7,0	6,5	6,8	6,1	0,2 (100 mA)
$I_{RRM} (T_j = 25^\circ C, i_{FG} = 60 mA), mA$	9,0	10,0	12,0	11,0	9,0	11,0	11,0	12,0	11,0	13,5	7,0 (240 mA)
$I_{RRM} (T_j = 25^\circ C, i_{FG} = 100 mA), mA$	14,0	16,0	18,0	18,0	13,0	16,0	14,0	16,0	16,1	15,2	21 (300 mA)
$I_{GT} (T_j = 25^\circ C), mA$	39	36	50	33	62	73	63	51	70	45	245
$U_{GT}^* (T_j = 25^\circ C), В$	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,80	1,80	1,80	1,80	2,50
$U_{GT} (T_j = 25^\circ C), В$	1,27	1,27	1,30	1,27	1,34	1,35	1,50	1,50	1,50	1,40	1,45

Примечание. Знаком (\*) отмечены паспортные параметры на соответствующие типы приборов.

**Таблица 3.** Результаты сравнительных испытаний оптотиристорных модулей и обычных тиристоров с регенеративным управляющим электродом

Параметр	Тип и № прибора					
	МТОТО9/3-250-16				Т242-80-12	Т353-800-32
	1.1	1.2	2.1	2.2		
$U_{DRM}^*, U_{RRM}^*, B$	1600	1600	1600	1600	1200	3200
$I_{T(AV)}^*, A$	250	250	250	250	80	800
$I_{DRM}^*, I_{RRM}^* (T_j = 100^\circ C), mA$	20	20	20	20	7 (125 °C)	70 (125 °C)
$I_{RRM} (T_j = 25^\circ C, i_{FG} = 0 mA), \mu A$	3,5	3,0	2,7	2,7	2,5	3,2
$I_{RRM} (T_j = 100^\circ C, i_{FG} = 0 mA), mA$	9,0	7,0	6,0	5,0	0,6 (125 °C)	7,0 (125 °C)
$I_{GT}^* (T_j = 25^\circ C), mA$	80	80	80	80	150	250
$I_{GT} (T_j = 25^\circ C), mA$	63	51	70	45	24	245
$I_{RRM} (T_j = 25^\circ C, i_{FG} = 30 mA), mA$	7,0	6,5	6,8	6,1	8,0 (1400 В)	0,2 (100 mA)
$I_{RRM} (T_j = 100^\circ C, i_{FG} = 30 mA), mA$	9,5	9,0	7,8	8,9	21 (1000 В, 125 °C)	7,1 (100 mA, 2400 В, 125 °C)
$I_{RRM} (T_j = 25^\circ C, i_{FG} = 60 mA), mA$	11,0	12,0	11,0	13,5	25 (1400 В)	7,0 (240 mA)
$I_{RRM} (T_j = 100^\circ C, i_{FG} = 60 mA), mA$	13,0	12,0	12,5	13,0	79 (1000 В, 125 °C)	65 (240 mA, 2400 В, 125 °C)
$I_{RRM} (T_j = 25^\circ C, i_{FG} = 100 mA), mA$	14,0	16,0	16,1	15,2	60 (1400 В)	21 (300 mA)
$I_{RRM} (T_j = 100^\circ C, i_{FG} = 100 mA), mA$	15,5	15,0	16,0	13,5	103 (1000 В, 125 °C)	115 (300 mA, 2400 В, 125 °C)

**Примечание.** Знаком (\*) обозначены паспортные параметры на соответствующие типы приборов.

ной площади оптического окна (рис. 3) и, следовательно, снижением величины полезно используемой энергии излучения светодиода. Но обратные токи утечек ( $I_{RRM}$ ) для приборов с регенеративным управляющим электродом, при прочих равных условиях ( $i_{FG} \neq 0$ ), приблизительно в 1,7–2,0 раза ниже, чем для аналогичных приборов без дополнительного усиления. Таким образом, конструкция прибора М2ТОТО-80-12\* с дополнительным интегрированным усилителем сигнала управления предпочтительнее обычной конструкции М2ТОТО-80-12. Однако недооценивать отрицательное влияние рассмотренного эффекта роста обратных токов утечек  $I_{RRM}$  и в этом случае нельзя. Паспортные величины  $I_{RRM}^*$  все равно превышаются.

Для оптотиристорных модулей МТОТО9/3-250-16 токи утечек  $I_{RRM}$  при комнатной температуре структуры ( $T_j = 25^\circ C$ ) оказались, как видно, близкими к паспортным значениям  $I_{RRM}^*$ , несмотря на то, что их не превысили.

Для мощного высоковольтного тиристора с выведенным регенеративным управляющим электродом Т353-800-32 обратный ток утечки  $I_{RRM}$  при подаче сигнала управления ( $i_{FG} \neq 0$ ) и низкой температуре ( $T_j = 25^\circ C$ ) оказывается в пределах нормы, установленной паспортом  $I_{RRM}^*$  (>70 mA). Ток управления  $i_{FG}$  для тиристорных Т353-800-32 имеет другой порядок величин, и его значения в режимах измерений выделены в соответствующих графах для  $I_{RRM}$ . Ток утечки  $I_{RRM}$  для прибора с выведенным управляющим регенеративным электродом также заметно возрастает при увеличении тока управления  $i_{FG}$  до уровня  $I_{GT}^*$ .

Повышение температуры структуры  $T_j$  для МТОТО9/3-250-16 до предельного значения ( $T_j = T_{JM} = 100^\circ C$ ) вызывает даже некоторое снижение токов утечек (табл. 3) в обратном направлении  $I_R$  ( $I_{RRM}$ ). Приборы, таким образом, обладают относительной тепловой стабильностью свойств. Суммарный ток утечки  $I_R$  оптотиристора в обратном направ-

лении складывается из тепловой и оптической составляющих, имеющих ограниченные величины. То есть также имеет место самоограничение токов  $I_R$ ,  $I_{RRM}$ .

Совсем иначе ведут себя тиристоры с выведенным управляющим электродом при одновременном воздействии сигнала управления ( $i_{FG} \neq 0$ ), обратного напряжения ( $U_R \neq 0$ ) и повышенной температуре ( $T_j = T_{JM}$ ) структуры. По данным таблицы 3 видно, что, например, для выбранного образца тиристора Т353-800-32 при отсутствии сигнала управления ( $i_{FG} = 0$ ) и максимальной температуре структуры ( $T_j = T_{JM} = 125^\circ C$ ) обратный ток утечки  $I_{RRM}$  равен всего 7 mA. Однако при токе управления  $i_{FG}$ , близком к значению отпирающего постоянного тока управления  $I_{GT}$  и максимальной температуре структуры ( $T_j = T_{JM}$ ), обратный ток утечки  $I_R$  возрастает до 115 mA при обратном напряжении  $U_R$ , составляющем всего 2400 В (75% от  $U_{RRM}$ ). То есть величина обратного тока утечки  $I_R$  даже при пониженном напряжении  $U_R$  существенно превышает паспортное значение  $I_{RRM}^*$ . Подобным образом ведет себя и тиристор на средний ток типа Т242-80-12.

Следует заключить, что эффект роста обратных токов утечек  $I_R$ ,  $I_{RRM}$  для тиристорных конструкций с выведенным управляющим электродом при повышении температуры структуры  $T_j$  имеет явно выраженный характер системного или сверхаддитивного (синергетического) эффекта.

Таким образом, можно сделать вывод о своего рода тепловой нестабильности структур обычных тиристорных с управляющим электродом в рассмотренных режимах, которая может снижать надежность работы преобразовательных устройств с их использованием.

Для тиристорных Т242-80-12 паспортное значение постоянного отпирающего тока управления  $I_{GT}$  равно 150 mA, а для тиристорных Т353-800-32 составляет 300 mA. В практических системах импульсы тока управления  $i_{FG}$  для этих приборов могут иметь

амплитуды более 1 А. Соответственно, вырастут и амплитуды обратных токов утечек  $I_R$ . Температура же структуры  $T_j$  работающего тиристора всегда повышенная. Приборы в этом случае нельзя будет использовать при установленных паспортных рабочих напряжениях  $U_{RWM}$ .

Необходимо отметить, что мощность потерь от протекающих через структуру неограниченных обратных токов утечек ( $I_R$ ,  $I_{RRM}$ ) выделяется на отдельных ее участках крайне неравномерно. Это может приводить к наиболее опасным процессам локальных перегревов отдельных частей структуры и быстрой их тепловой деградации, несмотря даже на сравнительно лучшие условия отвода энергии потерь в полупроводниковых кристаллах больших размеров.

*Автор выражает признательность Н. Вильяновой и О. Фролову из ОАО «Электровыпрямитель» за помощь при проведении измерений.*

## Литература

- Донской Н. В., Иванов А. Г., Никитин В. М. и др. Управляемый выпрямитель в системах автоматического управления / Под ред. А. Д. Поздеева. М.: Энергоатомиздат, 1984.
- Глинтерник С. Р. Тиристорные преобразователи со статическими компенсирующими устройствами. Л.: Энергоатомиздат, 1988.
- Уильямс Б. В. Силовая электроника: приборы, применение, управление / Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1993.
- Замятин В. Я., Кондратьев Б. В., Петухов В. М. Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры / Справочник. М.: Радио и связь, 1988.
- Чебовский О. Г., Моисеев Л. Г., Недошивин Р. П. Силовые полупроводниковые приборы / Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1985.
- Модули тиристорные и оптотиристорные: МТОТО-40(5П103ТТ-40); МТОТО-80(5П103ТТ-80); МТОТО-100(5П103ТТ-100). [www.proton-impuls.ru](http://www.proton-impuls.ru)
- Модули силовые полупроводниковые типов: МТОТО-100; МТОТО-125; МТОТО-160; (ТУ 16-91 ИЖТШ. 435000.009 ТУ). [www.optron-stavropol.ru](http://www.optron-stavropol.ru)
- Модули оптотиристорные: МТОТО9/3-200; МТОТО9/3-250 (ТУ У 32.1-30077685-019-2005). [www.element.zp.ua](http://www.element.zp.ua)
- Модули силовые оптотиристорные на токи 500–1000 А прижимной конструкции: СмМТОТО-500; СмМТОТО-630; СмМТОТО-800; СмМТОТО-1000 (КИАФ. 432312.021 ТУ). [www.lavmsme.ru](http://www.lavmsme.ru)
- Полупроводниковые приборы силовой электроники / Краткий каталог ОАО «Электровыпрямитель». Ульяновск: Ульяновский дом печати, 2007.
- Силкин. Е. Оптронные тиристоры в управляемых выпрямителях большой мощности // Компоненты и технологии. 2009. № 11.