

# МОЩНЫЕ ДИОДЫ И ТИРИСТОРЫ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

А.Гришанин, В.Елисеев, В.Мартыненко martin@moris.ru

Развитие компонентной базы силовой электроники связано с увеличением преобразуемой мощности единичных приборов, расширением номенклатуры, функциональных возможностей, повышением качества и надежности приборов и изделий на их основе. Несмотря на значительное развитие преобразовательной техники на базе униполярных и биполярных полностью управляемых полупроводниковых ключей для ряда областей применения, особенно в высокомошной и высоковольтной силовой электронике, по-прежнему технически оправданным и экономически востребованным остается применение биполярных однооперационных приборов: тиристоров и диодов. В статье представлена новая продукция ОАО "Электровыпрямитель" – крупнейшего разработчика и производителя силовых полупроводниковых приборов и преобразовательных устройств на их основе. За многие годы ОАО зарекомендовало себя хорошим поставщиком и надежным партнером. Приборы и оборудование предприятия надежно работают во многих отраслях промышленности в России и за рубежом (в 50 странах мира) уже более 40 лет.

ОАО "Электровыпрямитель" – динамично развивающаяся российская электротехническая компания с большим опытом в области разработок и производства силовых полупроводниковых приборов (СПП) и преобразовательной техники. За все годы существования предприятия были разработаны и внедрены в производство несколько поколений СПП, многие из которых, многократно превысив допустимые сроки службы, успешно работают и сегодня на транспорте, во многих отраслях промышленности, в электроэнергетике и военной технике. Высокий технический потенциал специалистов завода и наличие крупного полупроводникового производства позволяют ОАО "Электровыпрямитель" активно проводить новые разработки СПП и расширять ассортимент

выпускаемой продукции, ориентируясь на потребности рынка и мировое развитие полупроводниковой техники. В номенклатуре завода сегодня свыше тысячи типов биполярных СПП на токи от 10 до 10000 А и напряжение от 200 до 10 000 В. Это диоды, тиристоры, симисторы и беспотенциальные модули на их основе.

## ТИРИСТОРЫ

Высокая мощность и эксплуатационные качества СПП остаются главной задачей удовлетворения требований потребителей при создании современных преобразователей электрической энергии. Наиболее перспективный путь увеличения удельной коммутируемой мощности СПП – это дальнейшее повышение блокирующего напряжения

тиристоров, которое, в свою очередь, позволяет значительно уменьшить число последовательно соединяемых приборов.

Электрофизические параметры и конструкция кремниевых структур тиристоров нового поколения гарантируют оптимальный баланс между потерями во включенном состоянии и динамическими потерями. Это особенно важно для эффективного управления максимальными мощностями на низких частотах. Современные биполярные тиристоры характеризуются высокими значениями блокирующих вольт-амперных характеристик благодаря применению радиационно-легированного кремния с малым разбросом удельного сопротивления. В ОАО "Электровыпрямитель" разработана технология получения однородных диффузионных слоев и высоких времен жизни неосновных носителей заряда в базовых областях

тиристоров по всей площади кристалла диаметром до 103 мм, а также технология профилирования краевого контура с целью снижения электрических полей на поверхности кремниевой структуры.

Тиристоры имеют патентованную топологию четырехслойной структуры с внутренним усилением сигнала управления и эффективную шунтировку катодного эмиттера. Это обеспечивает быстрое и однородное включение, длительную эксплуатацию прибора при скоростях коммутации анодного тока  $di_T/dt \geq 200$  А/мкс и прямого напряжения  $dv_D/dt \geq 1000$  В/мкс.

В ОАО "Электровыпрямитель" разработан и освоен в серийном производстве широкий ряд тиристоров таблеточного исполнения на токи от 175 до 6900 А, блокирующие напряжения от 200 до 7400 В. Параметры некоторых новых мощных

Таблица 1. Параметры новых низкочастотных тиристоров

Тип	$V_{DRM}$ , $V_{RRM}$ , В	$I_{T(AV)}$ при $T_C=70^\circ\text{C}$ , А	$I_{TSM}$ при $t_p=10$ мс, кА	$V_{T(ТО)}$ при $T_{jmax}$ , В	$r_T$ при $T_{jmax}$ , МОм	$(di_T/dt)_{cr}$ при $T_{jmax}$ , А/мкс	$(dv_D/dt)_{cr}$ при $T_{jmax}$ , В/мкс	$R_{th(j-c)}$ , °С/Вт	$T_{jmax}$ , °С	$F_m$ , кН
T163-1000	3400–4400	1343	18	1,14	0,428	200	2000	0,016	125	33
T373-1250	4000–4800	1937	32	1,10	0,310	200	2000	0,011	125	45
T183-2500	3600–4200	3094	50	1,00	0,160	200	2000	0,008	125	70
T393-2500	3400–4200	4079	68	1,12	0,112	200	2000	0,006	125	80
T263-800	4400–5200	1127	15	1,20	0,600	200	2000	0,017	125	33
T183-2000	4400–5200	2620	40	1,07	0,240	200	2000	0,008	125	70
T293-2500	4400–5200	3258	60	1,07	0,190	200	2000	0,0065	125	80
T353-500	6000–7200	808	10	1,35	0,900	200	2000	0,019	125	24
T163-800	6000–7000	1072	12	1,30	0,650	200	2000	0,017	125	33
T173-1000	6000–7000	1529	24	1,30	0,450	200	2000	0,012	125	45
T183-1600	6000–7000	2080	40	1,25	0,400	200	2000	0,008	125	70
T383-2000	6800–7400	2100	35	1,20	0,390	200	2000	0,008	125	70
T193-2000	6000–7000	3068	54	1,32	0,190	200	2000	0,0065	125	80

Обозначения:  $V_{RRM}$  – повторяющееся импульсное обратное напряжение,  $V_{DRM}$  – повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии,  $I_{T(AV)}$  – максимально допустимый средний ток в открытом состоянии,  $I_{TSM}$  – ударный ток в открытом состоянии,  $V_{T(ТО)}$  – пороговое напряжение,  $(di_T/dt)_{cr}$  – критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии,  $(dv_D/dt)_{cr}$  – критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии,  $R_{th(j-c)}$  – тепловое сопротивление переход-корпус,  $F_m$  – усилие сжатия,  $T_C$  – температура корпуса,  $T_{jmax}$  – температура перехода максимальная,  $r_T$  – динамическое сопротивление,  $t_p$  – длительность импульса.

приборов из серии низкочастотных тиристорov приведены в табл.1.

Для надежной работы тиристорov в сборках с последовательным соединением очень важно также уменьшить разброс заряда обратного восстановления ( $Q_{RR}$ ). С этой целью введено доводочное облучение тиристорных структур ускоренными электронами ускорителя "Электроника - У003". Он входит в состав технологической линии производства СПП ОАО "Электровыпрямитель". Энергия ускоренных электронов 5-6 МэВ и разброс плотности пучка ускоренных электронов по площади развертки не более 10% обеспечивают однородное легирование по площади и глубине кремниевых структур СПП радиационными дефектами, которые служат центрами рекомбинации для неравновесных носителей заряда. Контролируемое введение радиационных дефектов позволяет гибко управлять временем жизни неосновных носителей заряда в полупроводниковых структурах приборов и, соответственно, всей системой электрических параметров.

## ФОТОТИРИСТОРЫ

Анализ тенденций развития СПП показывает, что применение тиристорov, управляемых светом (фототиристорov), позволяет принимать простые и надежные схемотехнические решения в самых разнообразных областях применения: высоковольтном электроприводе, компенсаторах реактивной мощности, высоковольтных линиях передачи постоянного тока, импульсной технике. Наиболее эффективно применение фототиристорov в схемах с последовательным соединением приборов. По сравнению с обычными тиристорами фототиристоры имеют ряд преимуществ: высокую нагрузочную и перегрузочную способность; точный временной контроль включения группы приборов; высоковольтную гальваническую развязку между цепью управления и силовой схемой преобразователя, встроенные функции самозащиты от пробоя. Особо надо выделить стойкость к электромагнитным помехам, которые могут приводить к ложным включениям (особенно в системах, где неизбежны длинные кабели управления).

Таблица 2. Параметры высоковольтных сетевых фототиристорov

Тип	$V_{BO}$ , В	$V_{DRM}$ , В	$V_{RRM}$ , В	$I_{T(AV)}$ при $T_C=70^\circ\text{C}$ , А	$I_{TSM}$ при $t_p=10$ мс, кА	$V_{T(TO)}$ при $T_{jmax}$ , В	$r_T$ при $T_{jmax}$ , МОм	$(di/dt)_{cr}$ при $T_{jmax}$ , А/мкс	$(dv_D/dt)_{cr}$ при $T_{jmax}$ , В/мкс	$t_q$ (тип) при $T_{jmax}$ , мкс	$R_{th(j-c)}$ , $^\circ\text{C}/\text{Вт}$	$F_m$ , кН
ТФ353-630	6200-6600	6000-6400	6600-7000	790	12	1,20	1,00	300	2000	630	0,0200	24
ТФ273-1000	6200-6600	6000-6400	6600-7000	1360	24	1,20	0,55	300	2000	630	0,0120	45
ТФ183-2000	6200-6600	6000-6400	6600-7000	2115	40	1,20	0,35	300	2000	630	0,0078	70
ТФ183-1600	7200-7400	7000-7200	7400-7800	1866	35	1,27	0,47	300	2000	800	0,0078	70
ТФ193-2500	6200-6600	6000-6400	6600-7000	2520	55	1,22	0,28	300	2000	630	0,0067	80
ТФ193-2000	7000-7800	6800-7600	7200-8000	2295	50	1,27	0,35	300	2000	800	0,0067	80

Обозначения:  $V_{BO}$  – напряжение переключения  $V_{RRM}$  – повторяющееся импульсное обратное напряжение,  $V_{DRM}$  – повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии,  $I_{T(AV)}$  – максимально допустимый средний ток в открытом состоянии,  $I_{TSM}$  – ударный ток в открытом состоянии,  $V_{T(TO)}$  – пороговое напряжение,  $(di/dt)_{cr}$  – критическая скорость нарастания тока в открытом состоянии,  $(dv_D/dt)_{cr}$  – критическая скорость нарастания напряжения в закрытом состоянии,  $R_{th(j-c)}$  – тепловое сопротивление переход-корпус,  $F_m$  – усилие сжатия,  $T_C$  – температура корпуса,  $T_{jmax}$  – температура перехода максимальная,  $r_T$  – динамическое сопротивление,  $t_q$  – время выключения,  $t_p$  – длительность импульса.





Рис.1. Фототиристор ТФИ193-2500-42

Фототиристоры легко управляются инфракрасным светом с оптической мощностью всего в несколько десятков милливатт, имеют отличные характеристики включения, низкие потери мощности в проводящем состоянии и при переключении.

Конструкция фототиристоров аналогична конструкции высоковольтного таблеточного тиристора, только вместо электрического управляющего вывода имеется оптический вход. Система ввода светового сигнала в корпус прибора расположена в центре катодного основания фототиристора в виде оптического окна. Оно расположено вблизи фоточувствительной области полупроводниковой структуры (рис.1).

Управляющий импульс передается в светочувствительную область кремниевой структуры фототиристора от полупроводникового инжекционного лазерного диода (ЛД) через фотоокно и оптический адаптер по оптоволоконному кабелю. Наилучшие характеристики включения тиристор имеет в диапазоне длин волн 950–1050 нм. Длина кабеля составляет от 0,5 м до 30 м, но может быть и больше, исходя из требований потребителей.

Для управления фототиристорами были разработаны лазерные излучатели, оптические драйверы на их основе и оптоволоконные кабели в комплекте с адаптерами.

Производимые сегодня в ОАО "Электровыпрямитель" СПП рассчитаны на токи до 2500 А и напряжения до 8000 В. Основные параметры высоковольтных сетевых фототиристоров, предназначенных для работы на частоте 50 Гц (60 Гц), приведены в табл.2.

Небольшой разброс таких параметров, как время задержки включения, падение напряжения в открытом состоянии, заряд обратного восстановления  $Q_{RR}$ , дает возможность использовать

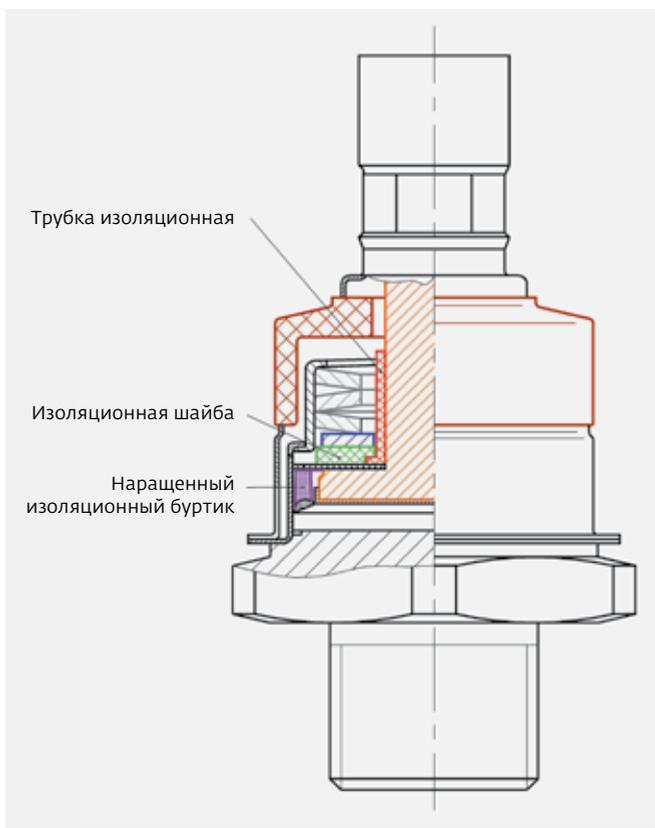


Рис.2. Конструкция высоковольтного штыревого диода

эти приборы в последовательных и параллельных соединениях.

По заказу возможно изготовление фототиристоров с интегрированными функциями самозащиты от пробоя, которые позволяют упростить или вообще исключить сложные и дорогие электронные схемы защиты при внешних критических воздействиях.

## ДИОДЫ

В области разработки мощных неуправляемых биполярных СПП за последние годы в ОАО "Электровыпрямитель" достигнуты значительные результаты: разработана и изготовлена серия супермощных диодов с блокирующими обратными напряжениями до 10 000 В (табл.3).

Все СПП таблеточного исполнения имеют повышенную механическую прочность, они надежно работают при воздействии номинальных вибрационных нагрузок в диапазоне частот от 0,5 до 500 Гц с ускорением 100 м/с<sup>2</sup> и при одиночных и многократных ударах с ускорением соответственно 1500 и 750 м/с<sup>2</sup>. Приборы сейсмостойкие и выдерживают землетрясения интенсивностью 9 баллов



по MSK-64. По требованию заказчиков приборы могут поставляться в термодинамически устойчивых корпусах, т.е. в корпусах, имеющих защитный показатель  $\int i^2 dt = 13,5 \cdot 10^6 A^2c$  и выдерживающих (не разрушаются) токи  $I_{RSCM}$  до 75 кА. Основное направление работ сегодня в области СПП табличного исполнения – это увеличение коммутируемой мощности.

Одновременно ОАО "Электровыпрямитель" продолжает совершенствовать приборы штыревой и роторной конструкции. В настоящее время на заводе начался выпуск новых высоковольтных низкочастотных тиристоров и диодов штыревой конструкции на токи 200–320 А и напряжения

от 2000 до 4400 В, диаметр полупроводникового элемента – 32 мм.

В новой конструкции тиристоров и диодов для увеличения напряжения ионизации электрических промежутков изменена конструкция изоляционной трубки и изоляционной шайбы и на периферии выпрямительного элемента специально наращивается изоляционный буртик (рис.2). В результате рабочее напряжение тиристоров и диодов увеличилось с 2000 до 4400 В.

Диоды штыревой конструкции изготавливаются как прямой, так и обратной полярности.

Для замены роторных диодов В6-200 паяной конструкции в пластмассовых корпусах разработано

Таблица 3. Параметры супермощных диодов

Тип	$V_{RRM}$ , В	$I_{F(AV)}$ при $T_C=85^\circ C$ , А	$I_{FSM}$ при $t_p=10$ мс, кА	$V_{TO}$ при $T_{jmax}$ , В	$r_T$ при $T_{jmax}$ , МОм	$R_{th(j-c)}$ , $^\circ C/Вт$	$T_{jmax}$ , $^\circ C$	$F_m$ , кН
Д163-2000	3400–4400	2520	31	0,90	0,154	0,016	160	33
Д173-3200	3400–4400	3940	43	0,90	0,103	0,010	160	45
Д183-4000	3400–4200	4680	60	0,90	0,095	0,008	160	70
Д193-5000	3400–4200	7300	67	0,85	0,040	0,0065	160	80
Д163-1600	4400–5200	1980	28	0,92	0,230	0,016	150	33
Д173-2500	4400–5200	3060	37	0,95	0,155	0,010	150	45
Д183-3200	4400–5000	4000	50	0,95	0,110	0,008	150	70
Д193-4000	4400–5000	4950	58	0,94	0,088	0,0065	150	80
Д163-1250	5200–6500	1490	21	1,0	0,350	0,016	140	33
Д173-2000	5200–6500	2530	29	1,0	0,250	0,010	150	45
Д183-2500	5200–6500	3170	40	1,0	0,200	0,008	150	70
Д193-3200	5200–6500	4180	45	1,0	0,135	0,0065	150	80
Д543-630	7000–8000	651	11	1,2	1,20	0,027	140	15
Д453-800	7000–8000	933	23	1,2	0,90	0,018	140	26
Д373-1600	7000–8000	1830	24	1,2	0,40	0,010	140	45
Д543-500	9000–10000	560	10	1,5	1,50	0,027	140	15
Д453-630	9000–10000	794	22	1,5	1,20	0,018	140	26
Д373-1250	9000–10000	1403	23	1,5	0,70	0,010	140	45

Обозначения:  $V_{RRM}$  – повторяющееся импульсное обратное напряжение,  $I_{F(AV)}$  – максимально допустимый средний ток в открытом состоянии,  $I_{FSM}$  – ударный ток в открытом состоянии,  $V_{TO}$  – пороговое напряжение,  $R_{th(j-c)}$  – тепловое сопротивление переход-корпус,  $F_m$  – усилие сжатия,  $T_C$  – температуре корпуса,  $T_{jmax}$  – температура перехода максимальная,  $r_T$  – динамическое сопротивление,  $t_p$  – длительность импульса.

Таблица 4

Тип	$V_{RRM}$ , В	$I_{F(AV)}$ ( $T_C$ , °C), А	$I_{FSM}$ при $t_p=10$ мс, кА	$V_{TO}$ при $T_{jmax}$ В	$r_T$ при $T_{jmax}$ , МОм	$R_{th(j-c)}$ , °C/Вт	$T_{jmax}$ , °C	$M_d$ , Нм
Д271-250	2600–3000	250 (130)	5,50	1,02	0,510	0,09	160	30
Д371-250	4000–4400	250 (116)	5,40	1,34	0,980	0,09	160	30
Д271-320	2000–2600	320 (123)	6,50	0,92	0,450	0,09	160	30
Д171-400	300–1800	400 (145)	14,0	0,90	0,560	0,085	190	30
Т371-250	2200–2600	302 (85)	7,5	0,93	0,73	0,09	125	30
Т471-200	4000–4400	200 (80)	4,0	1,85	1,24	0,09	125	30
Т371-320	2000–2200	320 (82)	8,0	0,80	0,45	0,085	125	30
Д275-200	2000–2600	200 (139)	8,0	0,80	0,74	0,09	160	16

Обозначения:  $V_{RRM}$  – повторяющееся импульсное обратное напряжение,  $I_{F(AV)}$  – максимально допустимый средний ток в открытом состоянии,  $I_{FSM}$  – ударный ток в открытом состоянии,  $V_{TO}$  – пороговое напряжение,  $R_{th(j-c)}$  – тепловое сопротивление переход-корпус,  $M_d$  – крутящий момент,  $T_C$  – температура корпуса,  $T_{jmax}$  – температура перехода максимальная,  $r_T$  – динамическое сопротивление,  $t_p$  – длительность импульса.

и освоено производство новых фланцевых диодов прижимной конструкции Д275-200 (рис.3). С помощью специального демпфирующего устройства центробежные нагрузки прикладываются не к полупроводниковому элементу, а к корпусу, обеспечивая надежную работу прибора в условиях больших механических нагрузок. Данные диоды предназначены



Рис.3. Диод Д275-200

для бесщеточных систем возбуждения мощных электрических машин. Эксплуатируются они в условиях длительных центробежных ускорений до 4900g (кратковременных до 6800g), направленных вдоль оси симметрии диода в сторону основания, и в условиях длительных тангенциальных ускорений 980g, действующих перпендикулярно оси диода. Electroдами служат медный круглый фланец (основание) и медный трубчатый токопровод.

Благодаря совершенствованию конструкции и технологии изготовления СПП, а также введению дополнительных испытаний и диагностирования приборов, интенсивность отказов приборов ( $\lambda$ ) достигает значения  $4 \cdot 10^{-8}$  час<sup>-1</sup>. Можно сказать, что технический уровень СПП производства ОАО "Электровыпрямитель" по основным параметрам и эксплуатационной надежности не уступает лучшим мировым аналогам. На заводе действует система менеджмента качества, сертифицированная по стандартам ГОСТ Р ИСО 9001-2008 (ISO 9001:2008), для железнодорожного транспорта РФ по НБ ЖТ ЦЛ-ЦТ 139-2003 и для оборонного заказа по ГОСТ РВ 15.002-2003 (РД В 319.015-2006). Предприятие имеет лицензии и разрешающие документы на право разработки и изготовления приборов и оборудования для атомных станций, объектов ОАО "Газпром", ОАО "ФСК ЕЭС".



