

Разработка и исследование мощного низкочастотного тиристора с блокирующим напряжением 10 кВ

В статье приведены результаты разработки нового сверхвысоковольтного тиристора с блокирующим напряжением 10 кВ диаметром 2 дюйма, полученные на основе численного моделирования и исследований его характеристик.

Валентин Мартыненко

martin@moris.ru,

**Алексей Гришанин
Антон Самойлов
Олеся Вельмискина
Татьяна Сергунина
Владимир Картаев**

nicpp@elvpr.ru

Введение

Развитие преобразовательной техники тесно связано с развитием полупроводниковых приборов силовой электроники. Ориентируясь на мировые тенденции и потребности рынка, специалисты ОАО «Электровыпрямитель» постоянно проводят научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, направленные на совершенствование характеристик выпускаемой продукции и разработку новых типов силовых полупроводниковых приборов (СПП) и технологических процессов их производства.

Несмотря на значительный прогресс в области развития СПП с полевым управлением, биполярные тиристоры, как и раньше, востребованы в высоковольтных объектах электроэнергетики, промышленности и транспорта, где требуется высокая надежность, а срок службы оборудования достигает 30–40 лет.

Преобразователи, применяемые, например, в компенсаторах реактивной мощности или электроприводах среднего напряжения, оснащены, как правило, большим количеством последовательно соединенных таблеточных тиристоров. Использование сверхвысоковольтных тиристоров может повысить надежность и увеличить срок службы преобразователей, а также существенно снизить массо-габаритные параметры и цену. Поэтому повышение блокирующего напряжения низкочастотных тиристоров до предельных для кремния значений является одним из важнейших трендов среди лидеров силовой полупроводниковой электроники. Некоторые из них уже представили результаты разработки и серийного освоения тиристора на сверхвысокие напряжения [1, 2].

В данной статье приведены результаты разработки отечественного низкочастотного тиристора с блокирующим напряжением 10 кВ.

Моделирование

Важным этапом разработки и проектирования СПП является математическое моделирование, которое учитывает электрофизические процессы в приборах, происходящие в реальных режимах эксплуатации. Моделирование представляет собой универсальный метод анализа и верификации конструктивно-технологических решений. При разработке конструкции новых приборов его роль очень велика, поскольку определяет правильность выбранных технических решений и снижает затраты на экспериментальные исследования.

Для описания стационарных и переходных процессов, протекающих при работе СПП, необходимо определить динамическое распределение концентрации носителей заряда, электростатического потенциала и температуры в его базовых областях. С этой целью проводится совместное решение феноменологической системы дифференциальных уравнений полупроводника (уравнений непрерывности, плотностей токов, Пуассона), уравнения теплопроводности, а также уравнений электрического баланса внешней цепи.

Расчеты проводились с помощью лицензионной версии пакета программ приборно-технологического моделирования TCAD Sentaurus компании Synopsys. Этот программный комплекс позволяет учитывать практически все известные физические процессы, происходящие в полупроводниковых структурах. При расчете структуры тиристора были использованы:

- диффузионно-дрейфовая модель переноса носителей заряда;
- модель подвижности носителей заряда для слабого электрического поля, учитывающая температурную, концентрационную зависимость и рассеяние носителей заряда на носителях;

- модель подвижности носителей заряда, учитывающая влияние параллельного электрического поля и температуры;
- модель температурной и концентрационной зависимости времени жизни носителей заряда;
- температурная, концентрационная модель Оже-рекомбинации;
- модель ударной ионизации.

В качестве аналитической аппроксимации распределений легирующих примесей были выбраны функции распределения Гаусса, наиболее точно учитывающие реальный профиль распределения легирующих примесей в полупроводниковом кристалле тиристора. Использовалась элементарная ячейка четырехслойной кремниевой структуры с шунтом, расположенным в центре катодного эмиттерного перехода. Моделирование было выполнено в цилиндрической системе координат с вертикальной осью вращения.

Блокирующее напряжение сверхвысоковольтного тиристора определялось выбором значений основных геометрических и электрофизических параметров кремниевых пластин: удельного сопротивления исходного кремния (ρ_n), ширины n -базы (W_n), времени жизни неосновных носителей заряда в n -базе (τ_p) и концентрационного профиля распределения легирующих примесей $N(x)$. Для тиристорov с высоким напряжением пробоя необходимо проводить глубокую диффузию акцепторной примеси с низкой поверхностной концентрацией и плавным градиентом вблизи высоковольтных p - n -переходов. В этом случае значительная часть приложенного обратного напряжения поддерживается диффузионной областью, что повышает напряжение пробоя. Также для улучшения температурной стабильности напряжения переключения использовалось технологическое шунтирование катодного эмиттера. Необходимо правильно выбирать значения ρ_n , W_n , τ_p , а также топологию катодного шунтирования и геометрию фаски, для того чтобы получить требующиеся значения блокирующих напряжений, статических и динамических параметров разрабатываемых тиристорov.

Расчет значений V_{BO} и V_{BR} проводился с учетом приложения к тиристору синусоидального импульса напряжения с амплитудой до 12 кВ и длительностью 10 мс. На рис. 1 показана расчетная зависимость напряжения пробоя тиристора при обратном смещении от удельного сопротивления ρ_n и ширины n -базы W_n кремниевой структуры. За напряжение V_{BR} принималось напряжение, при котором обратный ток во время нарастания синусоидального импульса напряжения достигал 200 мА.

На рис. 1 видно, что требованию $V_{BR} \geq 11$ кВ удовлетворяют полупроводниковые структуры как с шириной W_2 и удельным сопротивлением в диапазоне ρ_3 - ρ_5 , так и с шириной W_3 и удельным сопротивлением в диапазоне ρ_2 - ρ_5 . Дальнейшие расчеты производились для тиристорной структуры с удельным сопротивлением ρ_3 .

В реальных кремниевых структурах напряжение пробоя может быть ниже объемного

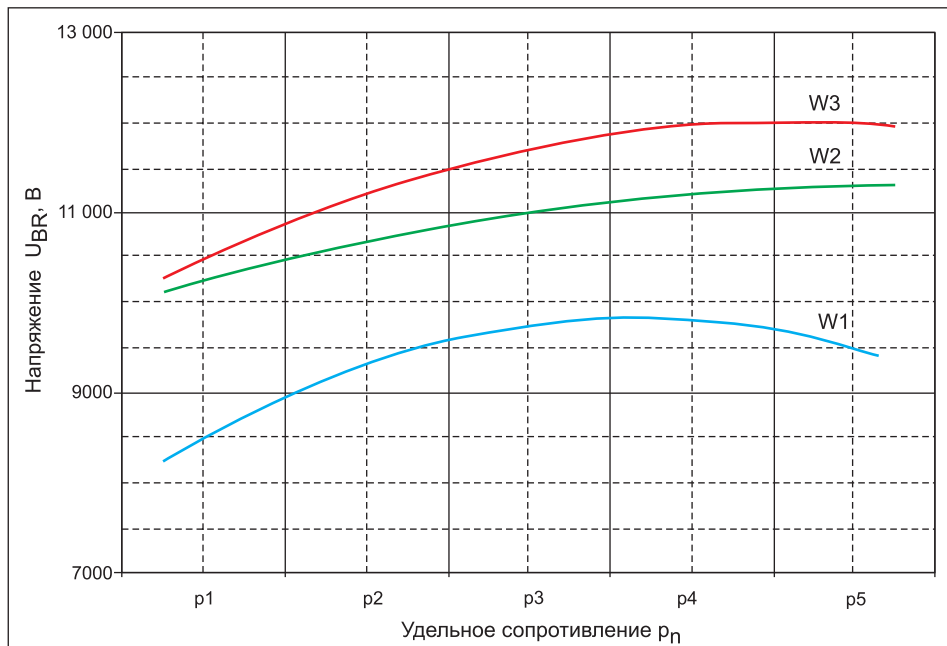


Рис. 1. Расчетная зависимость напряжения лавинного пробоя V_{BR} от удельного сопротивления ($\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4 < \rho_5$) и ширины высокоомной n -базы ($W_1 < W_2 < W_3$) тиристорной структуры при температуре перехода $T_j = 27^\circ\text{C}$

пробоя вследствие превышения электрическим полем своего критического значения в области выхода p - n -переходов на боковую поверхность (фаску). Для повышения устойчивости тиристора к пробую при кратковременных перенапряжениях необходимо, чтобы ударная ионизация и последующее лавинообразование происходили в объеме кремниевой структуры, а не в области фаски. В настоящее время при производстве высоковольтных тиристорov наиболее эффективным методом снижения напряженности электрического поля на поверхности p - n -переходов является механическое профилирование фаски с последующим ее травлением в смеси кислот и защитой, например, синтетическим каучуком.

Тиристорные структуры имеют два высоковольтных p - n -перехода. У каждого из них может быть свой оптимальный угол и соответствующий размер фаски. Для обеспечения симметричных прямых и обратных ветвей блокирующей ВАХ тиристора необходимо, чтобы на обеих поверхностях фа-

ски максимальная напряженность электрического поля не превышала 70 кВ/см и происходило свободное расширение области пространственного заряда (ОПЗ) при приложенных напряжениях вплоть до 11–12 кВ. Этим требованиям наиболее полно отвечают фаски с двумя положительными углами. В отечественной практике для тиристорov с напряжением переключения и обратным напряжением свыше 7 кВ применяется геометрия профиля фаски под названием «несимметричный ласточкин хвост (НЛХ)» [3]. Преимущество данной конструкции фаски состоит в том, что она, при своих сравнительно небольших размерах, сохраняет полезную площадь тиристорной структуры, а также обеспечивает очень высокие рабочие напряжения и симметрию блокирующих ВАХ.

На рис. 2 представлено распределение напряженности электрического поля в области фаски НЛХ моделируемого тиристора при приложении к структуре прямого и обратного блокирующих напряжений амплитудой 11 кВ.

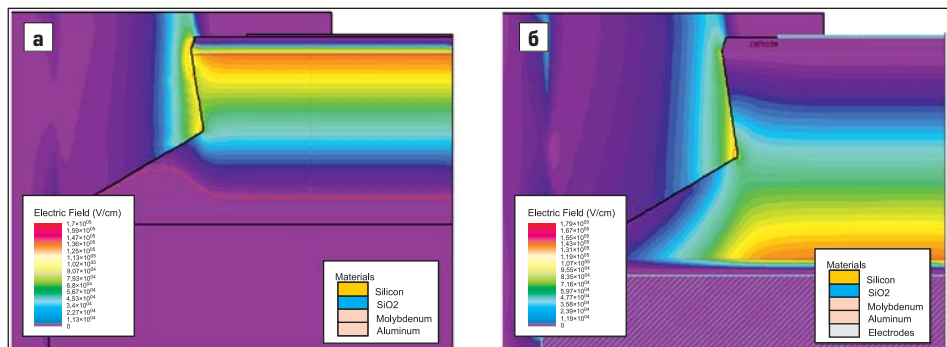
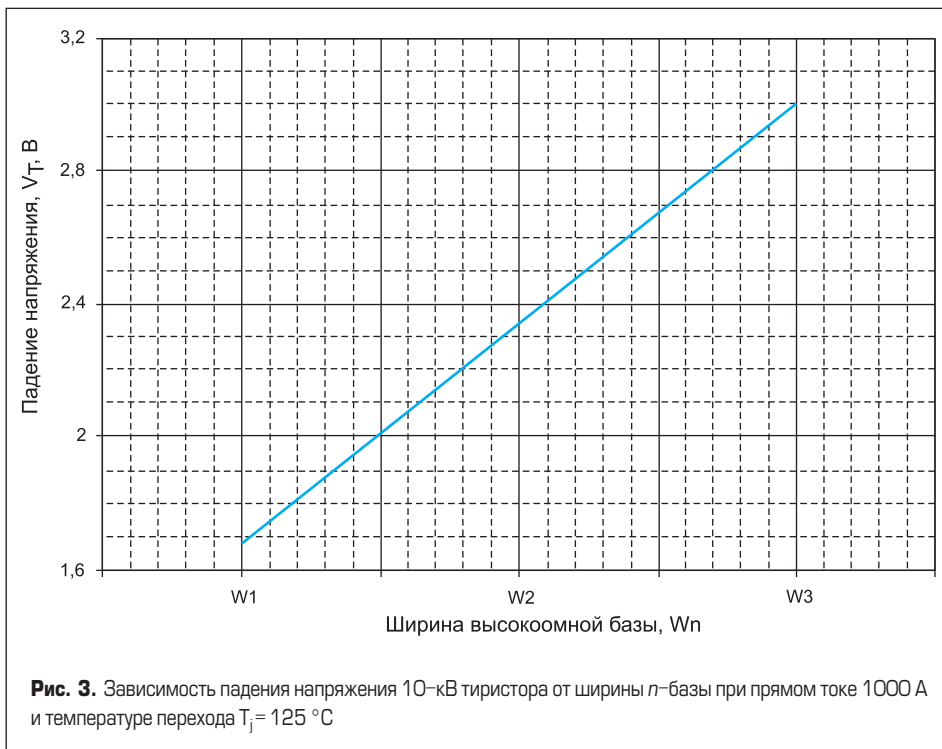


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля на поверхности фаски при блокирующем напряжении 11 кВ: а) прямое смещение; б) обратное смещение



Результаты моделирования показали, что при использовании фаски НЛХ на поверхности p - n -переходов при блокирующем напряжении 11 кВ электрические поля существенно ниже критических значений. ОПЗ на обеих фасках не ограничиваются высоколегированными областями p - n -переходов, создаются условия для их одинакового распределения и получения симметричных блокирующих ВАХ.

Были проведены расчеты вольт-амперных характеристик в проводящем состоянии высоковольтных тиристорных структур с различной шириной W_n при постоянной величине $\tau_p = 70$ мкс. В расчете учитывалось, что при протекании импульсов тока полусинусоидальной формы длительностью $t_p = 10$ мс имеет место изотермический режим, а процесс распространения включенного состояния полностью завершен. На рис. 3 приведен график зависимости $V_T = f(W_n)$ 10-кВ тиристора при прямом токе амплитудой 1000 А и при температуре 125 °С.

Исходя из анализа результатов моделирования, были определены основные требования к конструкции и электрофизическим параметрам кремниевой структуры сверхвысоковольтного тиристора, обеспечивающие блокирующее напряжение не менее 10 кВ, низкие потери в открытом состоянии и максимальную токовую нагрузку.

Конструкция и технология тиристоров

Главной задачей на первом этапе разработки сверхвысоковольтного тиристора было достижение напряжений пробоя, близких к расчетным значениям (11–12 кВ). На этом пути встретились определенные трудности, связанные с применением высокоомного кремния ($\rho \approx 0,7$ кОм), необходимого для указанных

напряжений. Нужны были дополнительные меры, чтобы уменьшить как минимум на порядок концентрационный фон неконтролируемых быстродиффундирующих примесей (Au, Cu, Mn, Fe и др.), которые при проведении диффузионных процессов могли изменить уровень легирования исходного кремния и снизить напряжение пробоя тиристора.

Кроме того, для получения сверхвысоких напряжений требуются кремниевые пластины толщиной около 2 мм. При использовании таких пластин технологический процесс должен обеспечивать высокие времена жизни неосновных носителей заряда в базовых областях тиристорных структур (не менее 200 мкс). В противном случае тиристоры будут иметь большие падения напряжения, низкие рабочие и ударные токи. Поэтому перед диффузией легирующих примесей была применена технология глубокой очистки кремниевых пластин. Она производилась в герметичной камере, в тумане, состоящем из смеси растворителей и кислот для удаления органических и неорганических загрязнений с поверхности пластин, которые затем отмывались в высокодеионизированной воде и сушились центрифугированием. Режим процесса очистки пластин кремния, состав реагентов, температура, последовательность и длительность обработки и сушки задавались компьютерной программой.

Процесс создания p - n -переходов многослойной p - n - p -структуры тиристора был построен на основе действующей на предприятии технологии мощных таблеточных тиристоров. Для воспроизводимого получения выходных параметров на всех этапах формирования тиристорной структуры проводился контроль электрофизических параметров τ_p и $N(x)$. По результатам этих измерений оценивалось качество каждого

из проведенных процессов и, если требовалось, корректировались режимы последующих операций.

Высоковольтные тиристоры с широкой n -базой имеют, как правило, более низкую стойкость к скорости нарастания анодного тока (di/dt), чем низковольтные, вследствие больших коммутационных потерь в высоковольтном тиристоре в момент включения и более низкой скорости распространения включенного состояния. Для того чтобы компенсировать эти потери в сверхвысоковольтном тиристоре, применена специальная конструкция полупроводникового элемента с центральным управляющим электродом и вспомогательным тиристором, площадь первоначального включения которого в 2 раза больше, чем у обычных тиристоров. Это обеспечило высокую стойкость высоковольтного тиристора к скорости нарастания анодного тока и уменьшило время задержки включения. Введение в конструкцию управляющего электрода резисторов, интегрированных в кремниевую структуру, дало возможность повысить помехоустойчивость нового прибора.

Применяемая технология профилирования краевого контура ослабляет электрические поля на поверхности кремниевой структуры и обеспечивает прибору заданные характеристики блокирующих ВАХ. Чтобы исключить межэлектродный поверхностный пробой при высоком блокирующем напряжении на фаске, между краем катодной металлизации и молибденовым термокомпенсатором полупроводникового элемента сформировано дополнительное защитное кольцо из кремнийорганического компаунда.

Полупроводниковый элемент тиристора представляет собой неразъемное соединение кремниевое кристалла, соединенного со стороны анода с молибденовым термокомпенсатором диаметром 56 мм. Металлизация катода полупроводникового элемента выполнена магнетронным напылением алюминиевого покрытия толщиной около 20 мкм, которое минимизирует электрические и тепловые сопротивления в прижимных контактных соединениях тиристора и обеспечивают хорошее растекание тока по катодной поверхности тиристорной структуры.

Полупроводниковый элемент тиристора собран в металлокерамическом корпусе в форме таблетки высотой 35 мм по технологии герметизации методом холодной сварки с заполнением внутренней среды сухим азотом. Армированный изолятор корпуса изготовлен из вакуум-плотного керамического материала Al_2O_3 . Керамический изолятор имеет развитую 6-реберную внешнюю поверхность с нанесенной защитной глазурью. Благодаря такой конструкции керамического изолятора прибор способен длительно работать с напряжением блокирующей ВАХ до 10 кВ при эксплуатации в соответствии с группой климатического исполнения УХЛ2 по ГОСТ 15150. Такой тиристор с условным обозначением Т253-630-100 продемонстрирован на рис. 4.



Рис. 4. Тиристор T253-630-100

Результаты исследований

Результаты расчетов и моделирования тиристора были подтверждены результатами испытаний опытных образцов тиристорov T253-630-100, проводившихся на автоматическом комплексе DTM 748 производства фирмы Schuster. Этот комплекс (рис. 5) предназначен для проверки статических параметров мощных высоковольтных таблеточных тиристорov, фототиристорov и диодов с диаметром кремниевых кристаллов 50–150 мм.

Установка используется для контроля статических параметров и характеристик приборов на токи до 15 000 А и на блокирующие напряжения до 13 кВ. Методики измерения параметров соответствуют российским и международным стандартам. Контроль осуществляется в автоматическом режиме по 18 параметрам тиристорov при комнатной и максимально допустимой температуре. Гибкое программное обеспечение позволяет легко создать любую последовательность измерений и управлять всеми функциями измерительных блоков. Результаты испытаний сохраняются в памяти ПК в виде протоколов. Они могут быть обработаны и представлены как на электронных носителях, так и распечатаны на бумаге.



Рис. 5. Полуавтоматический комплекс DTM 748 для контроля статических параметров тиристорov

На рис. 6 представлена типичная блокирующая вольт-амперная характеристика разработанного тиристора в закрытом состоянии, измеренная при комнатной температуре.

Видно, что достигнутое значение напряжения пробоя на опытных образцах высоковольтных тиристорov, равное 11,5 кВ, достаточно близко к расчетному (рис. 1). Были измерены обратные токи и токи утечки при температуре перехода $T_j = 125^\circ\text{C}$ для повторяющегося напряжения в прямом и в обратном направлении, равного 10 кВ. Значения токов I_{DRM} и I_{RRM} не превышали 400 мА.

На рис. 7 приведена типичная вольт-амперная характеристика исследуемого тиристора (зеленая кривая) в открытом со-

стоянии в диапазоне токов 200–1200 А при максимально допустимой температуре перехода.

Программное обеспечение комплекса DTM 748 позволяет на основе полученных ВАХ проводить автоматический расчет параметров динамического сопротивления r_T и порогового напряжения $V_{T(TO)}$ при заданных оператором условиях. Расчет максимально допустимого среднего тока в открытом состоянии тиристора проводили при протекании через него однополупериодного синусоидального тока с углом проводимости, равным 180 эл. град., на основе полученных значений $V_{T(TO)}$ и r_T , а также установившегося внутреннего теплового сопротивления переход-корпус

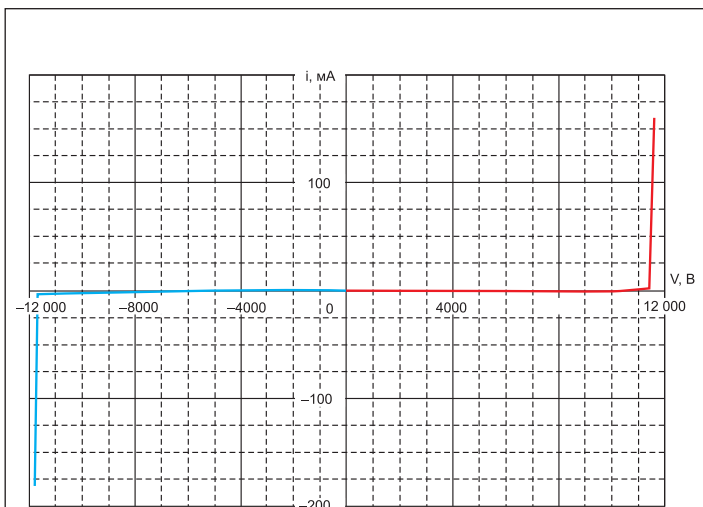


Рис. 6. Блокирующая вольт-амперная характеристика тиристора T253-630-100 при $T_j = 22^\circ\text{C}$ (красный цвет — прямая ВАХ, синий цвет — обратная ВАХ)

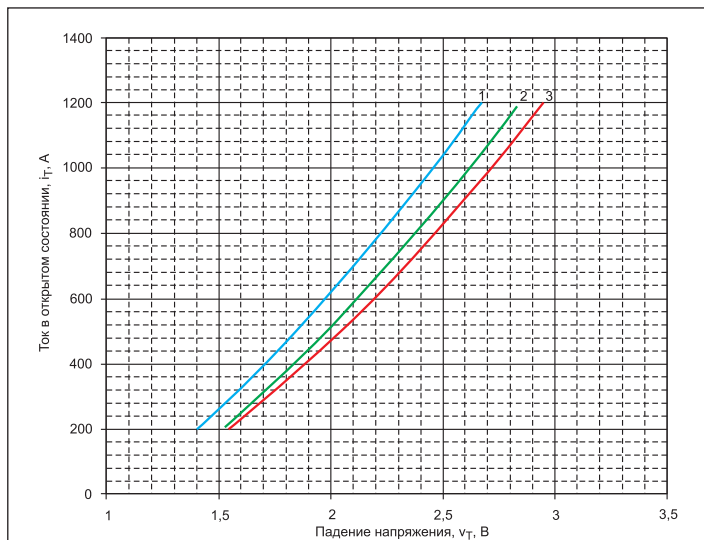


Рис. 7. Типичная ВАХ тиристора на повторяющемся напряжении 10 кВ в открытом состоянии при $T_j = 125^\circ\text{C}$ (1 — расчетная, 2 — измеренная, 3 — ВАХ аналога)

Таблица 1. Основные электрические параметры тиристора T253-630-100

Тип	V_{DRM}, V_{RRM} , В	$I_{T(AV)}$, А	I_{TSM} , кА	$V_{T(TO)}$, В	r_T , мОм	$(di_T/dt)_{crit}$, А/мкс	$(dv_D/dt)_{crit}$, В/мкс	f_{qT} , мкс	Q_{RR} , мкКл	$R_{th(j-c)}$, °С/Вт	T_{jmax} , °С
		$T_C=70$ °С	$t_p = 10$ мс	T_{jmax}	T_{jmax}	T_{jmax}	T_{jmax}	(тип)			
T253-630	10 000	690	12	1,54	1,30	200	1000	1000	2500	0,021	125

$R_{th(j-c)} = 0,021$ °С/Вт при температуре корпуса $T_C = 70$ °С.

Измеренные при комнатной температуре, в открытом состоянии для $I_T = 1000$ А падения напряжения $V_T \leq 2,30$ В. При проведении испытаний тиристоры были получены следующие результаты: при включении на частоте $f = 50$ Гц устойчивость к воздействию скорости нарастания анодного тока $(di/dt)_{crit} \geq 200$ А/мкс и устойчивость к скорости нарастания анодного напряжения $(dv/dt)_{crit} \geq 1000$ В/мкс.

Величина ударного тока I_{TSM} разработанного тиристора определялась экспериментальным путем. Через прибор пропускались одиночные импульсы тока полусинусоидальной формы длительностью $t_p = 10$ мс и амплитудой 10, 12, 14 кА. Испытания проводились при максимально допустимой температуре. Критерием предельного значения ударного тока было появление второго пика напряжения на кривой $V(t)$, связанного с термогенерационным процессом, при котором начинаются шнурование тока и сильный разогрев в приборе. Выход прибора на термогенерационный пик напряжения считается предельным режимом. В процессе испытаний было показано, что

при импульсах тока амплитудой $I_T = 14$ кА значения падения напряжения на тиристоре достигают критических значений $V_T \approx 24$ В, но полупроводниковая структура еще сохраняет свою блокирующую способность и не наблюдается ее деструктивных изменений. Рабочее значение ударного тока принимается равным 12 кА, исходя из 85% от амплитуды ударного тока, при котором наблюдается термогенерационный пик на кривой $V(t)$.

В табл. 1 приведены основные электрические параметры тиристора T253-630-100.

Параметры обратного восстановления, измеренные на нескольких образцах тиристора T253-630-100, представлены в табл. 2.

Коэффициент формы тока обратного восстановления $K_F = (dI_R/dt)_{нар} / (dI_R/dt)_{спад}$ исследуемых тиристоров близок к 1. Режим измерения заряда обратного восстановления: $T_j = 125$ °С, $I_T = 630$ А, $di_T/dt = -10$ А/мкс, $V_R = 100$ В.

Заключение

Результаты моделирования и экспериментальных исследований подтвердили возмож-

ность создания отечественного низкочастотного тиристора на основе кремния диаметром 56 мм с блокирующим напряжением 10 кВ. Повышение блокирующего напряжения низкочастотных тиристоров до предельно высоких значений имеет практическое значение для развития преобразовательной техники в высоковольтных областях применения (статические компенсаторы, мягкий пуск, выпрямители для приводов среднего напряжения). Использование сверхвысоковольтных тиристоров позволит уменьшить массо-габаритные показатели преобразователей, упростить силовую схему и схему управления, сократить расходы на комплектующие и материалы, снизить стоимость преобразователей, повысить их конкурентоспособность.

Работы по доведению нового тиристора до коммерческого продукта продолжаются. Полученные результаты планируется использовать при разработке тиристоры с предельными параметрами по току и напряжению на основе высокоомного нейтронно-легированного кремния большого диаметра.

Литература

1. Technische Information. T600N target data // Infineon Technologies. 2012.06.05.
2. Vobecky J. et al. New Thyristor Platform for HVDC (>1 MV) Transmission // PCIM Europe, 2014. 20-22 May. 2014. Nurnberg. Germany.
3. Агаларзаде П. С. и др. Основы конструирования и технологии обработки поверхности *p-n*-перехода. М.: Советское радио. 1978.

Таблица 2. Параметры обратного восстановления, измеренные на нескольких образцах тиристора T253-630-100

I_{RR} , А	t_{RR} , мкс	$(dI_R/dt)_{нар}$, А/мкс	$(dI_R/dt)_{спад}$, А/мкс	Q_{RR} , мкКл	K_F
126,77	31,24	8,13	8,68	1980,30	0,94
131,02	32,71	7,99	8,36	2143,06	0,96
133,11	33,09	7,92	8,55	2201,98	0,93
136,57	34,28	7,96	8,14	2340,74	0,98