

Силавые диоды

компании Microsemi

Microsemi Corporation (Microsemi), известный разработчик высоконадежных полупроводниковых дискретных и модульных компонентов, большое внимание уделяет постоянному улучшению рабочих характеристик и предельных параметров своей продукции. Устройства силавой электроники компании находят применение в системах электропитания различных вычислительных комплексов, базовых станций беспроводной связи, промышленных систем, медицинских приборов, радиопередающей и аналитической аппаратуры, лазерной техники, сварочных аппаратов, оборудования для производства полупроводников и т. д. В данной статье приведен обзор характеристик силавых диодов Microsemi, выпускаемых в настоящее время, особое внимание уделено карбид-кремниевым приборам, набирающим все большую популярность на рынке силавой электроники.

Константин Верхулевский

info@icquest.ru

Введение

Производство импульсных источников вторичного электропитания (ИВЭП) является одной из основных сфер назначения компонентов силавой электроники. В настоящее время для заказа доступно достаточно много стандартных моделей ИВЭП от отечественных и зарубежных производителей. При этом рынок маломощных источников (1–50 Вт) и источников средней мощности (50–500 Вт) перенасыщен, а их проектирование не вызывает особых сложностей, т. к. типовые проблемы разработки довольно полно описаны в статьях и книгах [1]. В то же время выбор мощных, в первую очередь заказных источников питания (от 500 Вт до 3–5 кВт и выше) существенно меньше, хотя они достаточно широко востребованы уже сегодня, и, по прогнозам специалистов, потребность в них будет только расти. Это связано с определенными сложностями, с которыми приходится сталкиваться при их разработке, и с со-

блюдением особых требований, касающихся особенностей структуры и схемотехнических решений.

Проектирование современных мощных ИВЭП идет по пути повышения энергоэффективности, основные тенденции последних лет в данной области включают в себя увеличение удельной мощности используемых силавых полупроводниковых элементов с одновременным уменьшением их массо-габаритных показателей, снижение тепловой нагрузки и обеспечение минимальных потерь. Как известно, существенный вклад в потери мощности в импульсных источниках электропитания вносит эффект обратного восстановления мощных высоковольтных диодов. Это особенно актуально для мостовых инверторов, работающих на индуктивную нагрузку, активных корректоров коэффициента мощности (ККМ), антипараллельных диодов мощных MOSFET и IGBT, выпрямителей с выходным напряжением более 100 В и частотой выше 100 кГц. Большие токи при обратном восстановлении диодов также являются причиной возникновения ра-

Таблица 1. Отличительные особенности серий силавых диодов Microsemi

Серия	Номинальные напряжения, В	Ключевые особенности	Типовые применения	Примечания
DL	600	Низкие значения V_{rr} ; ультрабыстрое восстановление; нормированные лавинные параметры.	Выпрямители; резонансные схемы.	Ультрабыстрое восстановление минимизирует или устраняет потребность в снабберах.
D	200, 300, 400, 600, 1000, 1200	Средние значения V_{rr} ; среднее быстродействие.	Схемы защиты от выбросов обратного тока; выпрямители; DC/DC-преобразователи.	Использование запатентованного процесса легирования платиной.
DQ	600, 1000, 1200	Высокоскоростные; нормированные лавинные параметры.	Корректоры коэффициента мощности; схемы защиты от выбросов обратного тока; DC/DC-преобразователи.	Ступенчатый эпитаксиальный слой сглаживает характеристику обратного восстановления.
DS	600	Сверхбыстродействующие.	Высокочастотные корректоры коэффициента мощности.	Использование запатентованного процесса легирования платиной.
Si Шоттки	200	Нормированные лавинные параметры; низкие значения V_{rr} .	Схемы защиты от выбросов обратного тока; выпрямители; DC/DC-преобразователи.	–
SiC Шоттки	650, 1200	Практически нулевое время обратного восстановления.	Корректоры коэффициента мощности; схемы защиты от выбросов обратного тока; DC/DC-преобразователи.	Низкие потери при переключении; высокая плотность мощности; высокие рабочие температуры.

Таблица 2. Основные характеристики кремниевых силовых диодов Microsemi

Наименование	Серия	V _{RR} , В (макс.)	I _F , А (средн.)	V _F , В (при T _J = +25 °С)	t _{rr} , нс (при T _J = +25 °С)	Q _{RR} , нКл (при T _J = +125 °С)	Тип корпуса	
Одиночные*								
APT15DQ120xG	DQ	1200	15	2,8	21	960	TO-247, TO-220	
APT15D120xG	D		15	2,0	32	1300		
APT30DQ120xG	DQ		30	2,8	24	1800		
APT30D120BG	D		30	2,0	31	3450	TO-247	
APT40DQ120BG	DQ		40	2,8	26	2200		
APT60DQ120BG	DQ		60	2,8	30	2800		
APT60D120xG	D		60	2,0	38	4000	TO-247, D3PAK	
APT75DQ120BG	DQ		75	2,8	32	3340	TO-247	
APT15DQ100xG	DQ		1000	15	2,5	20	810	TO-247, TO-220
APT15D100KG	D			15	1,9	28	1550	TO-220
APT30DQ100xG	DQ			30	2,5	22	1250	TO-247, TO-220
APT30D100BG	D			30	1,9	29	2350	TO-247
APT40DQ100BG	DQ	40		2,5	24	1430		
APT60DQ100BG	DQ	60		2,5	29	2325		
APT60D100xG	D	60		1,9	34	3600	TO-247, D3PAK	
APT75DQ100BG	DQ	75		2,5	33	2660	TO-247	
APT15DQ60xG	DQ	600		15	2,0	16	250	TO-247, TO-220
APT15D60xG	D			15	1,6	21	520	
APT30DQ60xG	DQ			30	2,0	19	400	
APT30D60BG	D			30	1,6	23	700	TO-247
APT40DQ60BG	DQ		40	2,0	22	480		
APT60DQ60BG	DQ		60	2,0	26	640		
APT60D60xG	D		60	1,6	40	920	TO-247, D3PAK	
APT75DQ60BG	DQ		75	2,0	29	650	TO-247	
APT100DL60BG	DL		100	1,25	45	3800		
APT30D40BG	D		30	1,3	22	360		
APT60D40BG	D		60	1,3	30	540	TO-247	
APT30D20BG	D		30	1,1	21	150		
APT30S20xG	Si Шоттки	200	30	0,83	25	448		TO-247, D3PAK
APT60D20BG	D		60	1,1	30	250	TO-247	
APT60S20xG	Si Шоттки		60	0,83	35	490	TO-247, D3PAK	
APT100S20BG	Si Шоттки	100	0,89	40	690	TO-247		
Сдвоенные**								
APT2X3xD120J	D	1200	2×27	2,0	31	3450	TO-247	
APT2X3xDQ120J	DQ		2×30	2,6	25	1800		
APT2X6xD120J	D		2×53	2,0	38	4000		
APT2X6xDQ120J	DQ		2×60	2,5	30	2890	TO-247	
APT2X10xD120J	D		2×93	2,0	47	5350		
APT2X10xDQ120J	DQ		2×100	2,4	45	5240		
APT2X3xD100J	D		1000	2×28	1,9	29	2350	TO-247
APT2X6xD100J	D			2×55	1,9	34	3600	
APT2X6xDQ100J	DQ			2×60	2,2	30	2350	
APT2X10xD100J	D			2×95	1,9	43	4050	SOT-227 (ISOTOP)
APT2X10xDQ100J	DQ			2×100	2,1	45	3645	
APT2X3xDQ60J	DQ			2×30	1,8	20	400	
APT2X3xD60J	D	2×30		1,6	23	700	TO-247	
APT2X6xDQ60J	DQ	2×60		1,7	27	650		
APT2X6xD60J	D	2×60		1,6	40	920		
APT2X10xDQ60J	DQ	2×100		1,6	30	980	TO-247	
APT2X10xD60J	D	2×100		1,6	34	1450		
APT2X15xDL60J	DL	2×150		1,25	53	3800		
APT2X3xD40J	D	400	2×30	1,3	22	360	TO-247	
APT2X6xD40J	D		2×60	1,3	30	540		
APT2X10xD40J	D		2×100	1,3	37	1050		
APT2X101DL40J	DL		2×100	1,0	40	3550	TO-247	
APT2X10xD30J	D		2×100	1,2	36	650		
APT2X31S20J	Si Шоттки		2×30	0,8	25	448		
APT2X61S20J	Si Шоттки		2×60	0,83	35	490	TO-247	
APT2X10xD20J	D		2×100	1,1	39	840		
APT2X101S20	Si Шоттки		2×100	0,89	40	690		
Сдвоенные, с общим катодом								
APT30DQ120BCTG	DQ		1200	2×30	2,8	26	2100	TO-247
APT15DQ100BCTG	DQ			2×15	2,5	20	810	
APT60DQ100LCTG	DQ	2×60		2,5	29	2325		
APT60D100LCTG	D	2×60		1,9	35	3600	TO-264	
APT15D60BCTG	DQ	2×15		1,6	21	520		
APT15DQ60BCTG	DQ	2×15		2,0	15	250		
APT30DQ60BCTG	DQ	2×30		2,0	19	400	TO-247	
APT30D60BCTG	D	2×30		1,6	23	700		
APT40DQ60BCTG	DQ	2×40		2,0	22	480		
APT60DQ60BCTG	DQ	2×60		2,0	26	640	TO-264	
APT60D60LCTG	DQ	2×60		1,6	30	920		
APT30D40BCTG	D	2×30		1,3	22	360		
APT60D40LCTG	D	2×60	1,3	30	540	TO-264		
APT30D30BCTG	D	300	2×30	1,2	25		1300	
APT30D20BCTG	D	200	2×30	1,1	21		150	
APT30S20BCTG	Si Шоттки	200	2×30	0,8	25	448	TO-247	
APT60S20BCTG	Si Шоттки		2×60	0,83	35	490	T-MAX	
APT100S20LCTG	Si Шоттки		2×100	0,89	40	690	TO-264	
Сдвоенные, полумостовая конфигурация								
APT15D100BHBG	D	1000	2×15	1,9	28	1550	TO-247	
APT30D100BHBG	D		2×30	1,9	29	2360		
APT30DQ60BHBG	DQ		2×30	2,0	22	480		
APT30D60BHBG	D	600	2×30	1,6	25	700	TO-247	
Сдвоенные, с общим анодом								
APT30D100BCAG	D	1000	2×30	1,9	30	2350		TO-247
APT15D60BCAG	D		2×15	1,6	20	520		
APT30D60BCAG	D		2×30	1,6	25	700		
APT30D20BCAG	D		200	2×30	1,1	21	150	
Сдвоенные, последовательно соединенные								
APT15DS60BG	DS	600	15	3,2	17	85	TO-247	
APT30DS60BG	DS		30	3,2	13	180		

* — «x» в наименовании меняется на «K» при использовании корпуса TO-220, В — TO-247 и S — D3PAK;
 ** — «x» в наименовании меняется на «0» при антипараллельной конфигурации диодов и на «1» при параллельной (кроме диодов Шоттки).

диономех, что требует применения экранов, увеличивающих массу и габариты устройства [2].

Традиционно используемые кремниевые диоды представляют собой проверенное десятилетиями эксплуатации решение. Они отличаются высокими значениями обратного напряжения (более 1 кВ) и способны коммутировать токи в сотни ампер, технология их изготовления хорошо отлажена, а многие производители предлагают свои варианты устройств в различном корпусном исполнении. Но, вместе с тем, у них есть и существенные недостатки, обусловленные предельными свойствами самого материала. Например, допустимое рабочее напряжение мощного кремниевого (Si) диода зависит от толщины кристалла. Чтобы создать диод, способный работать без пробоя с напряжениями до 1200 В, потребуется общая толщина слоя кремния в 120 мкм. Массивная полупроводниковая структура вызывает не только увеличение стоимости и габаритов изделия, но и неизбежно приводит к повышению потерь мощности. Снизить их пытаются за счет внедрения областей различной формы, увеличивающих число неосновных носителей. В результате при выключении диода требуется дополнительное время на рассасывание этих носителей, типовое время обратного восстановления обычно находится в диапазоне 25–100 мкс. Все это ухудшает быстродействие высоковольтных Si-диодов и ограничивает их использование в цепях с рабочей частотой выше 1 кГц.

В связи с этим во многих применениях на смену им пришли Si-диоды Шоттки, диоды с быстрым восстановлением (Ultra-Fast Recovery Diodes FRED), а также диоды, выполненные на основе карбида кремния (SiC). Каждая из этих трех групп, отличающихся уровнями рабочих напряжений и имеющих свои достоинства и недостатки, обладает общей чертой — малым временем обратного восстановления, не превышающим десятков наносекунд. Компания Microsemi предлагают свою линейку силовых диодов, включающую высококачественные компоненты данных типов.

Силовые диоды Microsemi

В настоящее время компанией выпускаются Si-диоды Шоттки, четыре серии Si-диодов с быстрым восстановлением (DL, D, DQ и DS), а также семейство диодов на основе SiC. Они ориентированы на решения, работающие в широком диапазоне напряжений, и удовлетворяют самым жестким требованиям, предъявляемым к мощным высоковольтным устройствам [3]. Их основные отличительные особенности представлены в таблице 1.

Силовые Si-диоды данных серий отличаются высокой скоростью переключения и мягким восстановлением, обеспечивающим минимизацию потерь при коммутации. Выпускаются одиночные и сдвоенные диоды на напряжения от 200 до 1200 В и токи от 15 до 150 А, их основные рабочие характеристики показаны в таблице 2 [4].

Сдвоенные устройства содержат два диода в одном корпусе, либо независимых

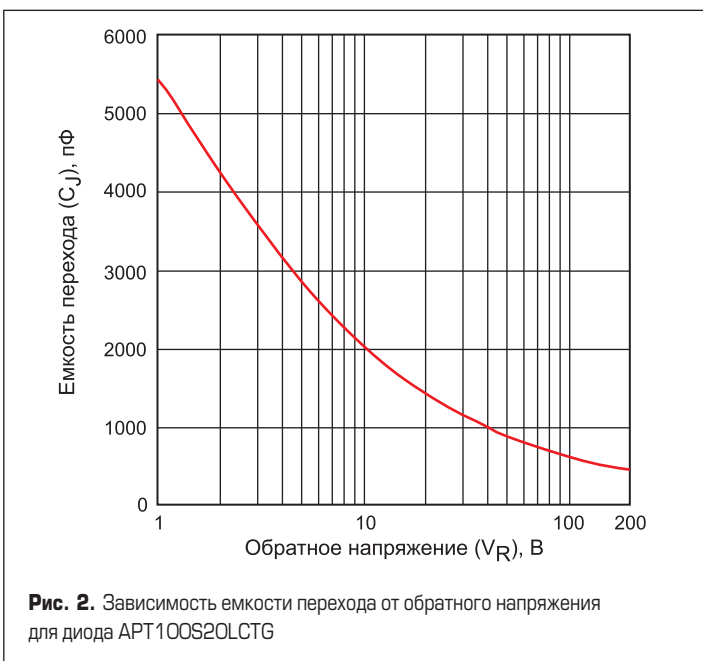
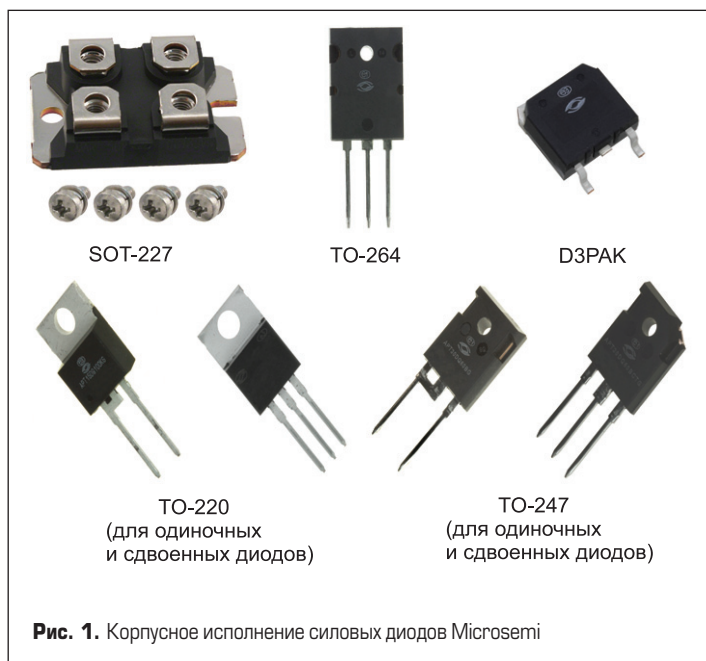


Рис. 2. Зависимость емкости перехода от обратного напряжения для диода APT100S20LCTG

(параллельных или антипараллельных), либо объединенных в различных конфигурациях (последовательно соединенные, с общим катодом, с общим анодом, с полумостовой схемой включения). Первые из них доступны в четырехвыводном корпусе SOT-227 (ISOTOP), вторые, как правило, изготавливаются в стандартных трехвыводных TO-247, TO-220, TO-264 и D3PAK (рис. 1). Исключением являются устройства серии DS, в которых два последовательно соединенных диода не имеют вывода средней точки. Диоды в сборке имеют практически идентичные технические параметры и одинаковый рабочий температурный режим, что является одним из главных факторов увеличения надежности устройства в целом.

Весьма существенной особенностью многих диодов Microsemi является нормирование параметров лавинного пробоя (допустимой энергии и начального тока) для различных условий. Это позволяет использовать диоды с меньшим допустимым обратным напряжением, получая выигрыш либо в виде снижения потерь (за счет меньших V_F), либо уменьшения стоимости примерно на 20–25%.

Si-диоды Шоттки

Как известно, в отличие от обычных диодов, диоды Шоттки изготавливаются не на основе классического *p-n*-перехода, а путем использования перехода металл-полупроводник, также называемого барьером Шоттки. Этот барьер обладает рядом положительных свойств, к которым относятся пониженное падение напряжения при прямом включении и очень маленький заряд обратного восстановления, повышающий быстродействие устройств. Последнее связано с тем, что в структуре диодов Шоттки практически отсутствуют неосновные носители заряда, существенно влияющие на их инерционность. Низкое время восстановления позволяет применять их на рабочих частотах от сотен кГц и выше, например для выпрямления ВЧ-напряжения. Стоит отметить, что весьма

малое прямое падение напряжения (0,2–0,4 В) характерно только для диодов Шоттки с обратным напряжением не более 50–60 В, силовые приборы данного типа, рассчитанные обычно на предельные напряжения до 200 В, имеют сопоставимое с Si-диодом значение параметра. Среди недостатков диодов Шоттки также можно выделить крайнюю чувствительность к кратковременному превышению уровня допустимого обратного напряжения, в результате которого они могут выйти из строя, и повышенный обратный ток, значительно увеличивающийся с ростом температуры кристалла.

Si-диоды Шоттки производства Microsemi обозначаются литерой S в наименовании компонента. В силовой линейке компании представлены 11 моделей с величиной прямого тока до 100 А и максимальным напряжением 200 В. Все они обладают низким напряжением V_F (0,8–0,89 В), малый разброс его значений упрощает параллельное соединение диодов. Одиночные APT30S20xG, APT60S20xG и APT100S20BG с временем восстановления от 25 до 40 нс и емкостью перехода от 150 до 470 пФ (при $V_R = 200$ В) выполнены в корпусах TO-247 и D3PAK, предназначенных для эксплуатации в диапазоне рабочих температур $-55...+150$ °С. При этом максимальный обратный ток утечки составляет 0,5 мА при комнатной температуре и 15 мА при повышении рабочей температуры до $+125$ °С. Сдвоенные диоды APT2X31S20J, APT2X61S20J и APT2X101S20 доступны в корпусе SOT-227, имеющем габариты 38×25×12 мм и вес не более 29 г, низкое тепловое сопротивление переход–корпус (0,33 °С/Вт), а также гальваническую изоляцию между выводами и основанием — 2500 В постоянного тока. Три модели с общим катодом APT30S20BCTG, APT60S20B2CTG и APT100S20LCTG, каждая из которых объединяет по два диода с рабочим током 30, 60 и 100 А соответственно, рекомендуются для использования в им-

пульсных источниках питания, инверторах, драйверах двигателей, преобразователях напряжения, быстродействующих выпрямителях. Наличие мощных диодов в стандартных широко распространенных корпусах позволяет упростить и удешевить конструкцию устройств с их применением. Емкость перехода имеет ярко выраженную зависимость от обратного напряжения, ее значение, доступное в документации, указывается для предельного V_R (рис. 2).

Диоды с быстрым восстановлением

Появление ультрабыстрых диодов данного типа было обусловлено потребностью в компонентах с рабочими напряжениями 1 кВ и выше, обладающих минимально возможным временем обратного восстановления. Технология производства FRED основана на использовании легирования кремния методом диффузии золота или платины. Так, высококачественные диоды компании Microsemi, полученные при помощи запатентованного процесса легирования платиной, имеют величину допустимого напряжения в закрытом состоянии до 1200 В, а по своим свойствам обратного восстановления могут легко соперничать с диодами Шоттки. Максимальная рабочая температура перехода, предусмотренная технологией, составляет $+175$ °С.

На рис. 3 показана типовая кривая обратного восстановления ультрабыстрого диода и схема для ее получения. В момент открывания ключевого транзистора VT1 начинается уменьшение тока диода I_F затем он пересекает нулевой уровень, меняет знак и достигает значения I_{RRM} , называемого в технической документации пиковым током обратного восстановления. Суммарное время обратного восстановления t_{RR} складывается из длительностей спада и роста тока обратного восстановления.

В технической документации также приводится величина заряда обратного восстановления Q_{RR} , полезная при расчете тепловых

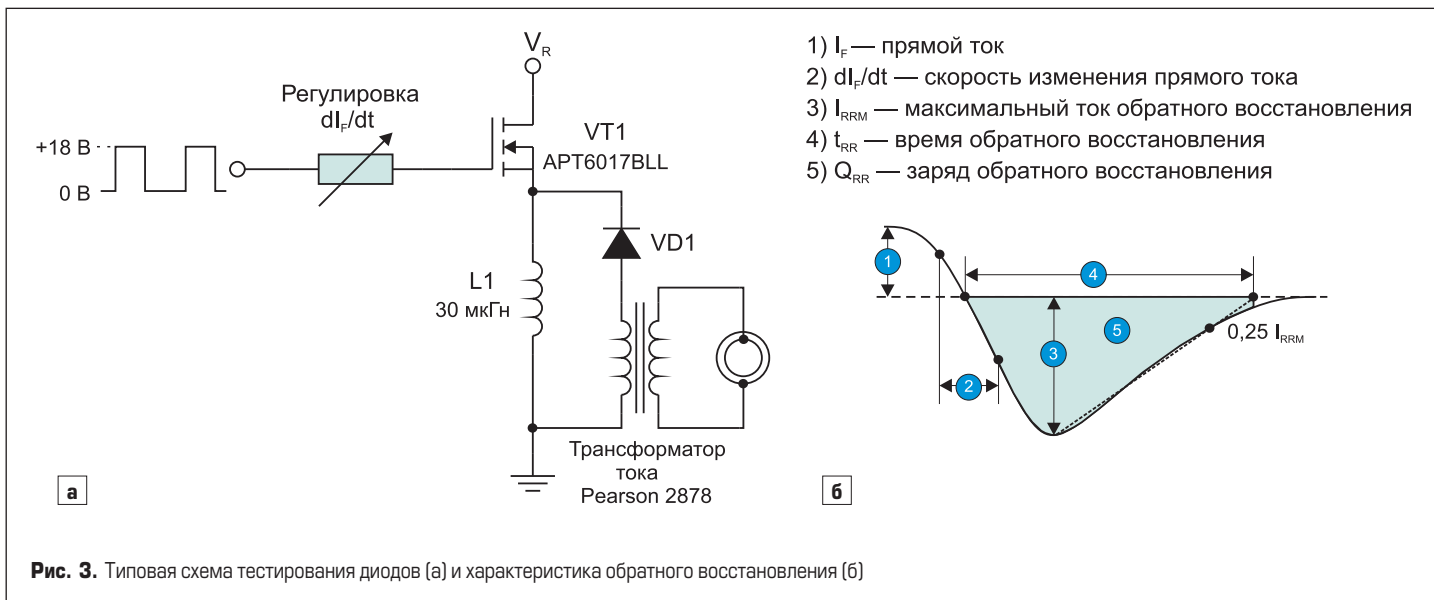


Рис. 3. Типовая схема тестирования диодов (а) и характеристика обратного восстановления (б)

потерь, возникающих в процессе обратного восстановления диода.

В настоящее время компанией Microsemi выпускаются четыре семейства диодов с различной скоростью переключения, позволяющих разработчикам оптимизировать потери мощности в конкретных применениях. Серия DL включает в себя всего четыре диода, характеризующихся низким значением прямого напряжения (не более 1,25 В), предельным обратным напряжением 600 В и ультрамягким восстановлением. Она позиционируется для выпрямительных и резонансных схем. Стоит отметить сдвоенные диоды APT2X150DL60J и APT2X151DL60J в корпусе SOT-227, образованные двумя одиночными диодами с максимальным среди всех FRED-приборов прямым током (150 А). Диоды серии D, предназначенные для применения в импульсных источниках питания со средними частотами переключения, рассчитаны на рабочие напряжения 200, 300, 400, 600, 1000 и 1200 В. Серия представлена наиболее широко, состоит из 61 диода (одиночных и сдвоенных) во всех возможных конфигурациях. В нее входят компоненты, у которых диапазон по среднему прямому току составляет от 15 до 100 А, а время обратного восстановления — от 21 до 47 нс (при токе 1 А и температуре перехода +25 °С). Характерной чертой устройств серии D являются низкие значения токов утечки, слабо зависящие от температуры. Например, у диода APT2X60D120J данный показатель не превышает 250 мкА при номинальном напряжении и температуре перехода +25 °С и увеличивается до 500 мкА при $T_j = +125$ °С. Компоненты серии DQ с обратными напряжениями 600, 1000 и 1200 В и широким диапазоном номинальных мощностей также имеют низкий заряд обратного восстановления. Использование этих диодов позволяет уменьшить динамические потери и электромагнитные наводки в мощных импульсных преобразователях с высокой частотой коммутации. Большая часть из 45 различных моделей, входящих в серию, изготавливается в типовых корпусах TO-247, TO-220

и TO-264, предназначенных для сквозного монтажа. Быстродействующие диоды самой малочисленной серии DS, состоящей из двух компонентов, рекомендуются для применения в высококачественных ККМ, где время обратного восстановления должно быть минимальным. Сдвоенные диоды APT15DS60BG и APT30DS60BG обладают временем восстановления всего 13 и 17 нс и емкостью перехода 24 и 43 пФ соответственно.

Возможные сферы применения FRED Microsemi:

- антипараллельные диоды для ВЧ коммутрующих устройств;
- быстродействующие диоды в схемах управления двигателями и электроприводами;
- выпрямители в импульсных преобразователях напряжения;
- индуктивные нагреватели;
- ультразвуковые очистители и сварочные аппараты;
- AC/DC-, DC/DC-источники питания, инверторы;
- ККМ.

Главным минусом кремниевых FRED является сильная зависимость характеристики обратного восстановления от температуры и скорости прямого тока. Для ограничения токов обратного восстановления разработчикам часто приходится использовать демпфирующие цепочки (активные или пассивные), что приводит к усложнению и удорожанию схемы. Внедрение диодов Шоттки на основе SiC позволяет устранить эти недостатки.

SiC-диоды Шоттки

По сравнению с аналогичными кремниевыми приборами электронные компоненты на основе SiC обладают рядом преимуществ,

определяемых свойствами материала изготовления (табл. 3).

Основные преимущества SiC в сравнении с Si:

1. Большая ширина запрещенной зоны (примерно в три раза) обеспечивает работу при повышенных температурах и отличную устойчивость к воздействию радиации, гарантируя тем самым долговременную надежность полупроводниковых приборов, работающих в жестких условиях эксплуатации. Применение устройств из данного материала весьма перспективно при разработке оборудования военного и космического назначения. Также благодаря этому свойству практически отсутствуют токи утечки (менее 70 мкА при температуре кристалла +200 °С), снижающие термоэлектронную эмиссию за пределами барьера.
2. Критическая напряженность электрического поля, на порядок превышающая соответствующий показатель у Si, в сочетании с довольно высокой подвижностью электронов позволяет значительно улучшить все основные электрические характеристики приборов силовой электроники (уровни рабочих напряжений, мощность и т. д.).
3. Высокая теплопроводность (на уровне меди) упрощает проблему отвода тепла, снижая тепловое сопротивление кристалла по сравнению с Si почти в два раза.
4. Высокая плотность мощности при очень малых размерах кристалла позволяет радикально уменьшить габариты и массу преобразовательного оборудования на базе SiC, а также увеличить эффективность работы, особенно на малых нагрузках и высоких частотах переключения.

Таблица 3. Сравнение физических характеристик Si и SiC

Свойства материала	Si	SiC
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,12	3,2
Критическая напряженность электрического поля, $\times 10^6$ В/см	0,3	3
Теплопроводность, Вт/м·К	1,56	4,9
Температура плавления, °С	1420	2830

Главное достоинство SiC-диодов Шоттки заключается в их исключительных динамических параметрах, основная причина которых — незначительный заряд обратного восстановления (десятки нанокулонов). Для наглядности на рис. 4 показаны характеристики выключения SiC-диода Шоттки и Si-FRED при разных температурах эксплуатации. Форма тока, протекающего через SiC-диод Шоттки, имеет характер переходного процесса, амплитуда которого не зависит от температуры, отсутствие токов восстановления обеспечивает практически чистый фронт сигнала. Результатом этого является уменьшение прогнозируемых потерь на переключение в типичных применениях импульсной силовой электроники и возможность работы с частотами более 500 кГц. Более того, сокращаются помехи, создаваемые работой преобразователя на основе SiC-диодов, что опять-таки позволяет упростить фильтры электромагнитных помех и сократить их размеры.

Компания Microsemi производит достаточно широкую номенклатуру силовых SiC-диодов Шоттки с диапазоном рабочих токов 2–30 А и максимальными обратными напряжениями 600 и 1200 В. Предназначенные преимущественно для устройств средней (1–10 кВт) и большой мощности (10 кВт–1 МВт), SiC-приборы стабильно функционируют в диапазоне температур –65...+175 °С. Конструктивно выпускаются в герметичных малогабаритных корпусах для планарного и сквозного монтажа, в настоящее время доступны одиночные диоды либо их пары в трех конфигурациях. В таблице 4 приведены их основные характеристики.

Вся линейка выгодно отличается высокой скоростью переключения, не зависящей от температуры эксплуатации, малой емкостью перехода (десятки пикофарад) и низким тепловым сопротивлением переход–корпус, не превышающим для ряда моделей 0,7 °С/Вт. Также стоит отметить малый ток утечки, полученный благодаря широкой запрещенной зоне SiC. Например, у диода MSC010SDA120K его величина составляет всего 3 мкА при температуре +25 °С (50 мкА при +175 °С). Прямое падение напряжения имеет положительный температурный коэффициент, что значительно упрощает параллельное соединение диодов, так как в этом случае не требуются дополнительные меры по выравниванию токов. На рис. 5 показана типовая зависимость прямого падения напряжения диода MSC020SDA120B от тока при различных температурах.

Основные сферы применения включают в себя:

- импульсные источники питания;
- умножители напряжения;
- мощные инверторы;
- преобразователи для солнечных батарей;
- активные высоковольтные ККМ;
- приводы электродвигателей;
- другое силовое оборудование.

Применение данных диодов особенно целесообразно и экономически выгодно при работе на повышенных частотах и напря-

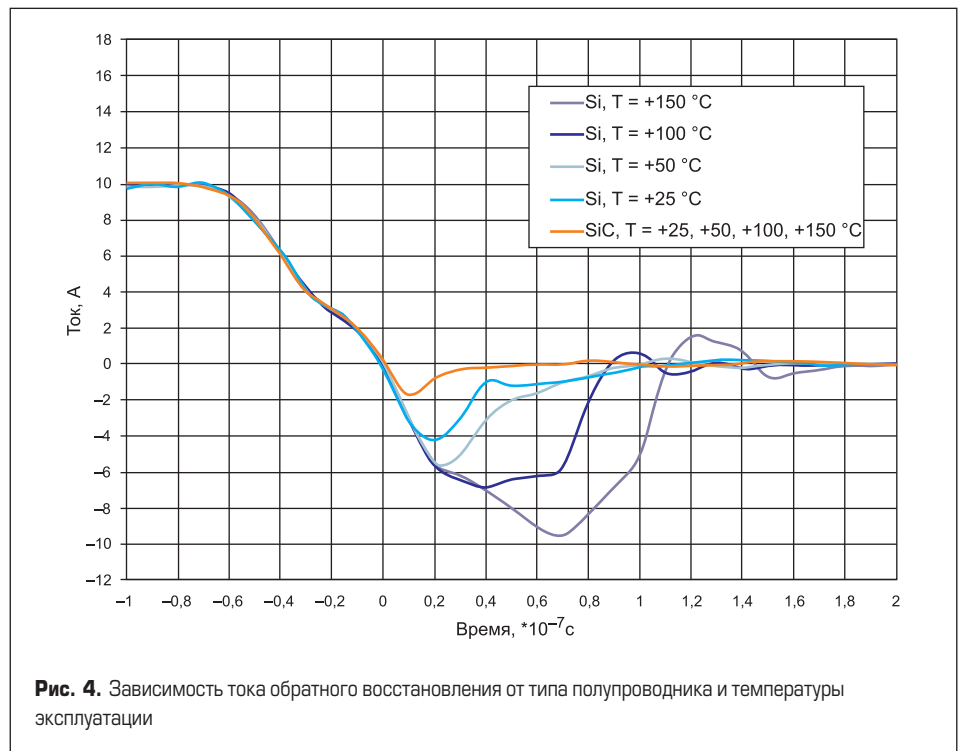


Рис. 4. Зависимость тока обратного восстановления от типа полупроводника и температуры эксплуатации

жениях. Благодаря уникальным свойствам SiC-диодов они могут работать на частотах более 500 кГц, обеспечивая эффективность устройств порядка 92%.

Например, в ККМ простая замена бустерного кремниевого FRED на SiC-диод (VD6 на рис. 6) обеспечивает снижение тепловой нагрузки почти вдвое. Практически такой же

Таблица 4. Основные параметры SiC-диодов Шоттки компании Microsemi

Наименование	V _{RR} , В (макс.)	I _F , А (ном.)	V _F , В (при T = +25 °С)	Тип корпуса		
Одиночные*						
MSC030SDA120B	1200	30	1,5	TO-247		
APT10SCE120B		10				
MSC010SDA120K		20				
MSC020SDA120B		30		1,5	TO-247	
MSICSF30120					TO-254	
MSICST30120					TO-3	
MSICSS30120		600		1,2	U1	
MSICSN05120					5	TO-257
MSICSS05120					10	U4
MSICSN10120						TO-257
MSICSS10120					1,1	U3
MSICST02120					2	TO-39
MSICST30120					30	TO-3
MSICSN10060					10	TO-257
MSICSS10060					2	U4
MSICST02060	1,0		TO-39			
Сдвоенные, с общим анодом						
MSICSE30120CA	1200	30	1,5	TO-258		
MSICSN05120CA		5	1,2	TO-257		
MSICSS05120CA		10	1,1	U3		
MSICSN10120CA				TO-257		
MSICSN10060CA	600	10	1,1	TO-257		
Сдвоенные, с общим катодом						
MSICSE30120CC	1200	30	1,5	TO-258		
MSICSN05120CC		5	1,2	TO-257		
MSICSS05120CC		10	1,1	U3		
MSICSN10120CC				TO-257		
MSICSS10120CC		600	10	1,1	TO-257	
MSICSN10060CC				U3		
Сдвоенные, полумостовая конфигурация						
MSICSE30120D	1200	30	1,5	TO-258		
MSICSN05120D		5	1,2			
MSICSN10120D		10	1,1		TO-257	
MSICSN10060D	600					

результат получается при использовании схемы с мягким переключением, но при этом количество элементов повышается в три раза, что увеличивает габариты, снижает надежность и, соответственно, выигрыш от повышения частоты преобразования. В итоге стоимость решения на базе SiC-диода оказывается значительно ниже.

На рис. 7 изображен типовой пример применения SiC-диодов Шоттки Microsemi в качестве антипараллельных диодов мощных IGBT и MOSFET и модулей. Такой подход позволяет кардинально сократить потери обратного восстановления, вносящие существенный вклад в рассеиваемую мощность.

Заключение

Линейка высоковольтных диодов компании Microsemi с обратными напряжениями до 1200 В и рабочими токами до 150 А в различном корпусе исполнения соответствует современным требованиям рынка силовой электроники, а во многих случаях и превосходит их. Быстродействующие устройства с минимальным временем обратного восстановления, изготавливаемые на основе как Si, так и SiC, находят применение в силовом оборудовании широкого спектра назначения.

Литература

1. Эраносян С. Электронные компоненты для мощных импульсных источников питания // Силовая электроника. 2006. № 2.
2. Полищук А. Высоковольтные диоды Шоттки из карбида кремния в источниках электропитания с преобразованием частоты // Компоненты и технологии. 2004. № 5.
3. www.microsemi.com.
4. Каталог Microsemi Power Portfolio 2017. www.microsemi.com/document-portal/doc_download/14813-power-semiconductors-power-modules-and-rf-power-mosfets-catalog

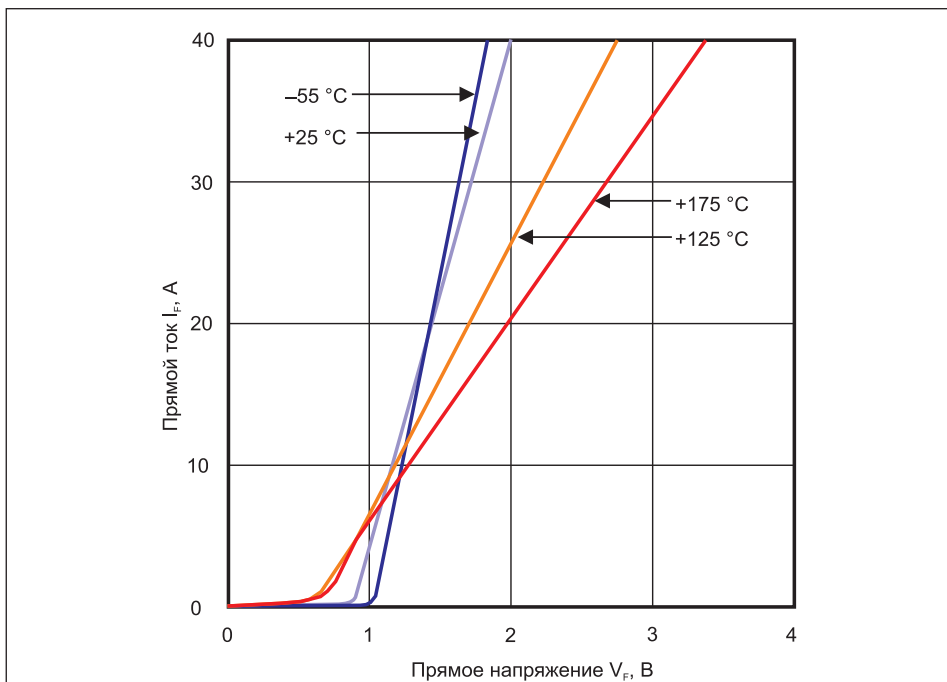


Рис. 5. Прямая ВАХ диода MSCO20SDA120B

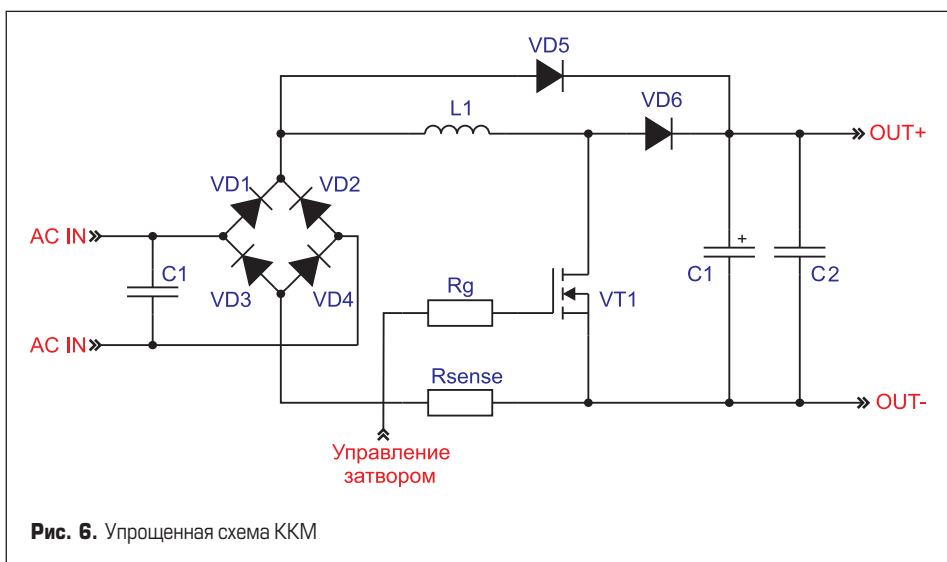


Рис. 6. Упрощенная схема ККМ

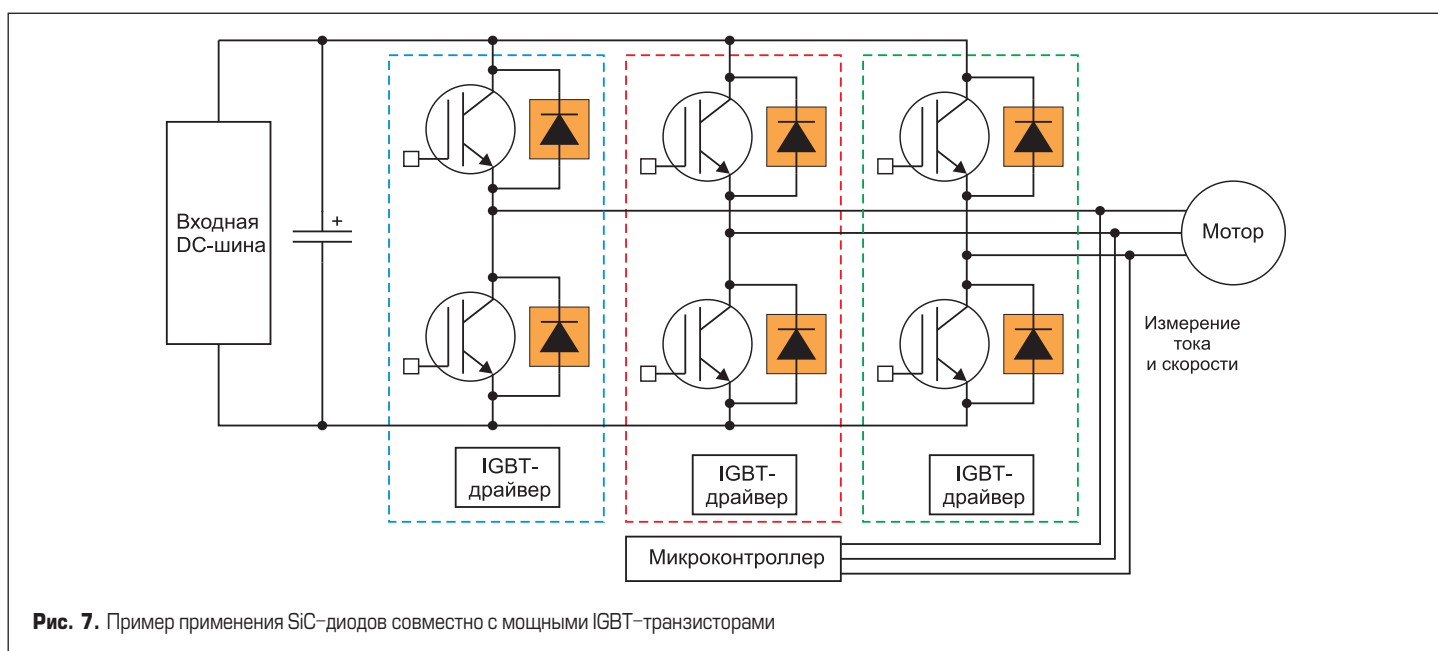


Рис. 7. Пример применения SiC-диодов совместно с мощными IGBT-транзисторами