

# Дискретные устройства и модульные компоненты на основе карбида кремния, производимые компанией Microsemi

**Применение новых широкозонных полупроводников при проектировании и производстве приборов силовой электроники позволяет добиться значительного улучшения их рабочих характеристик с одновременным уменьшением массо-габаритных показателей. В данной статье рассматриваются технические параметры дискретных устройств и высоконадежных модулей производства компании Microsemi, изготавливаемых на основе одного из наиболее популярных материалов — карбида кремния (SiC).**

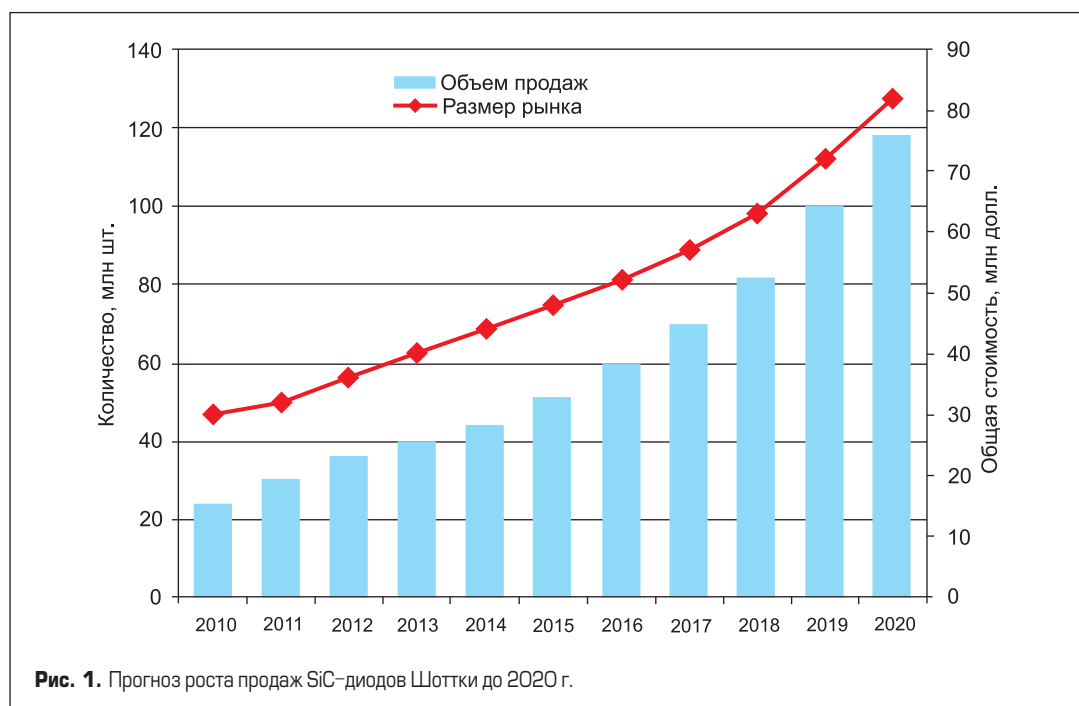
Константин Верхулевский

info@icquest.ru

## Введение

За последние несколько лет в разработке устройств силовой электроники наметилась отчетливая тенденция к применению полупроводниковых материалов с большой шириной запрещенной зоны (карбида кремния, нитрида галлия и др.). Уникальные свойства этих материалов, в том числе большие коэффициенты теплопроводности, значительные уровни напряженности электрического поля и т. д., обеспечивают создание на их основе приборов с рекордными энергетическими показателями. Одним из наиболее

перспективных и распространенных материалов является карбид кремния, широко использующийся для улучшения таких рабочих характеристик дискретных устройств и модульных конструкций, как быстродействие, предельные коммутируемые токи и напряжения, статические и динамические потери. По прогнозам рыночных аналитиков компании Yole Development, ежегодный рост производства силовых полупроводников на основе карбида кремния в период с 2015 по 2020 г. составит 39%. Активное развитие отрасли показано на примере увеличения количества выпускаемых SiC-диодов Шоттки (рис. 1).



Основные характеристики SiC, позволяющие добиться существенного улучшения параметров приборов на их основе по сравнению с характеристиками кремния и арсенида галлия, приведены на рис. 2.

Полевые транзисторы, диоды и другие электронные приборы на основе карбида кремния обладают рядом преимуществ по сравнению с аналогичными приборами на базе кремния. Большая ширина запрещенной зоны, обусловленная более высоким барьером Шоттки по сравнению с Si и GaAs, приводит к уменьшению величины тока утечки (менее 70 мкА при 200 °С), который при повышенной температуре кристалла снижает термоэлектронную эмиссию за пределами барьера [1]. Критическая напряженность электрического поля пробоя карбида кремния более чем на порядок превышает соответствующие показатели у Si и GaAs, что приводит к значительному снижению сопротивления в открытом состоянии и уменьшению общих потерь (рис. 3). В свою очередь, малое удельное сопротивление в открытом состоянии в сочетании с высокой плотностью тока (до 1000 А/см<sup>2</sup>) и теплопроводностью способствует уменьшению габаритов силовых приборов. Высокая теплопроводность SiC снижает тепловое сопротивление кристалла (по сравнению с Si примерно в 3 раза), а также при этом упрощаются требования к системе охлаждения [1].

В результате применение устройств на основе SiC позволяет радикально уменьшить габариты и массу преобразовательного оборудования, а также увеличить эффективность работы за счет более высоких частот преобразования. На характеристики карбид-кремниевых приборов незначительно влияет изменение температуры эксплуатации вследствие более высокой температуры перехода. Это обеспечивает долговременную надежность полупроводниковых приборов, работающих в тяжелых условиях, а отличная радиационная стойкость делает карбид кремния практически незаменимым материалом для изготовления оборудования военного и космического назначения.

Силовые приборы на основе SiC предназначены преимущественно для устройств

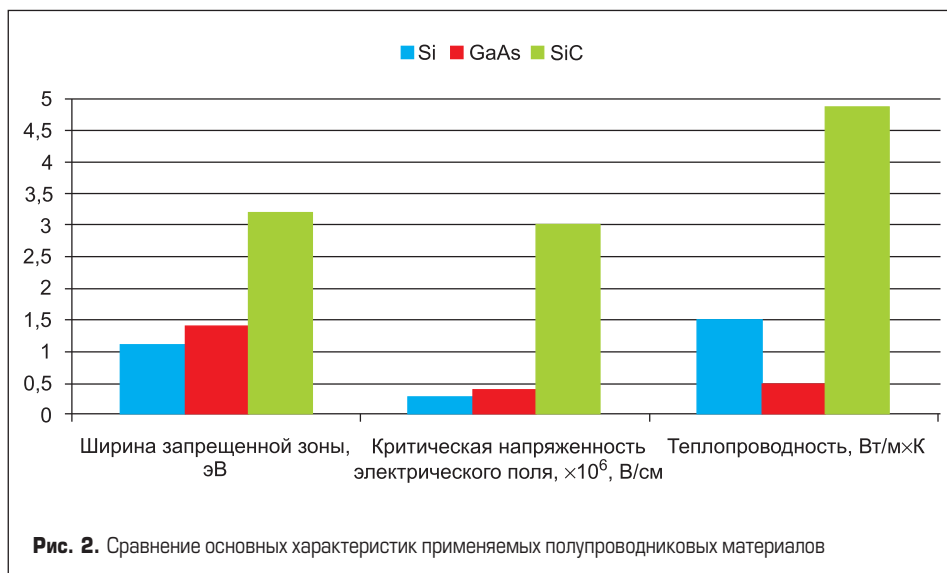


Рис. 2. Сравнение основных характеристик применяемых полупроводниковых материалов

средней (1–10 кВт) и большой мощности (10 кВт–1 МВт). Полупроводниковые приборы на основе SiC широко используются в оборудовании для нефте- и газодобычи, в металлургии и машиностроении, в авиационной и космической технике, в электромобилях, в нефтехимическом производстве, в авиарадарах, устройствах СВЧ-связи, в атомной энергетике.

В настоящее время компания Microsemi представлена на рынке силовой электроники следующей SiC-продукцией [2]:

- быстродействующими диодами Шоттки с максимальным обратным напряжением 1700 В;
- MOSFET-устройствами с напряжением пробоя 1200 В;
- силовыми модулями на их основе как полностью из SiC, так и частично, в различных конфигурациях и с широким вы-

бором конструктивно-технологического исполнения.

### SiC MOSFET

Новые высоковольтные карбид-кремниевые MOSFET-устройства APT40SM120x и APT50SM120x разработаны на основе запатентованной технологии с целью повышения энергоэффективности ключевых схем (табл. 1). Их отличительная особенность и в то же время основное преимущество — значительно более низкое удельное сопротивление исток-сток в открытом состоянии ( $R_{DS(ON)}$ ), чем у кремниевых полевых транзисторов. Так, сопротивление открытого канала транзисторов APT40SM120x и APT50SM120x составляет 80 и 50 мОм при температуре +25 °С и увеличивается до 1,5 и 1,8 Ом при максимальных температурах эксплуатации [3].

Таблица 1. Основные параметры SiC MOSFET-устройств компании Microsemi

Наименование	Тип канала	$V_{BR(DSS)}$ , В	$I_D$ , А (пост.)	$R_{DS(ON)}$ , мОм (при $V_{GS} = 20$ В)	$P_{DISS}$ , Вт (макс.)	Тип корпуса
APT40SM120B	N	1200	40	80	273	TO-247
APT40SM120S			40	80		D3PAK
APT50SM120B			50	50		TO-247
APT50SM120S			50	50		D3PAK

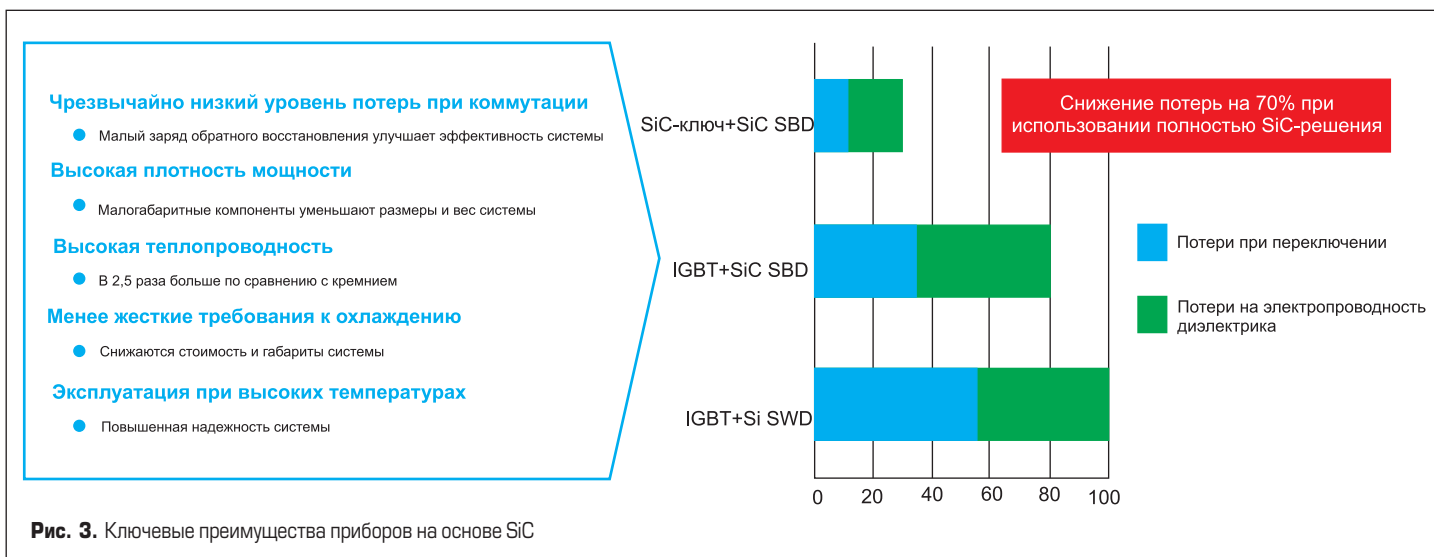


Рис. 3. Ключевые преимущества приборов на основе SiC

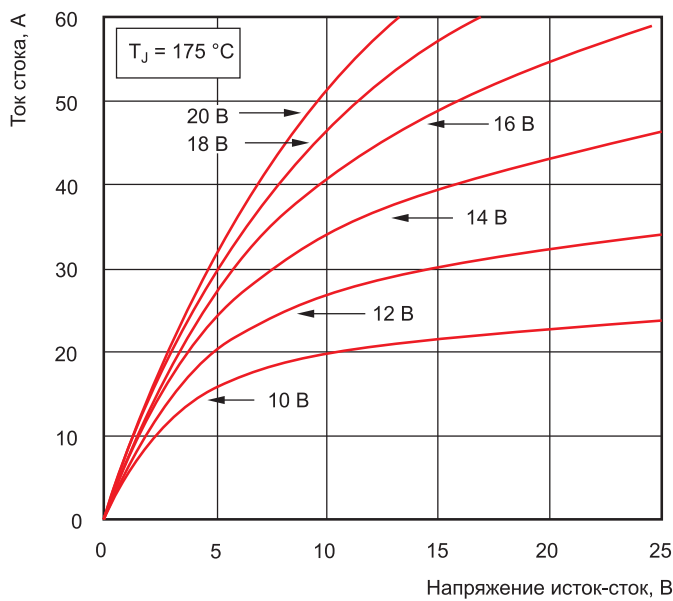


Рис. 4. Выходные характеристики APT40SM120B

Компоненты отличаются высоким напряжением пробоя, равным 1200 В. При этом максимальный ток стока достигает 40 и 50 А для APT40SM120x и APT50SM120x соответственно. Малый заряд затвора (не более 130 и 166 нКл), а также его низкое сопротивление минимизируют потери энергии на переключение и обеспечивают отличные динамические характеристики. Это приводит к повышению рабочих частот и, следовательно, к уменьшению габаритов применяемых совместно с транзисторами внешних элементов. Коммутация нагрузки происходит под действием управляющего напряжения затвора VGS, лежащего в пределах -10...+25 В.

Транзисторы, выполненные в герметичных корпусах ТО-247 и D<sup>3</sup>РАК с максимальной рассеиваемой мощностью 273 Вт, обладают низким значением температурного сопротив-

ления кристалл-корпус 0,55 °С/Вт и проходят обязательное тестирование в широком диапазоне температур -55...+175 °С. Выходные характеристики транзистора APT40SM120B при температуре перехода +175 °С приведены на рис. 4.

Из других их особенностей следует отметить низкий уровень собственного электромагнитного шума и стойкость к коротким замыканиям. В основном они применяются в импульсных источниках питания с различными топологиями силовых преобразователей напряжения (повышающие, понижающие, обратноточковые, несимметричные мосты), корректорах коэффициента мощности, схемах управления электроприводами, инверторах и т. д.

Помимо предлагаемых моделей, в ближайшее время компания планирует выпускать

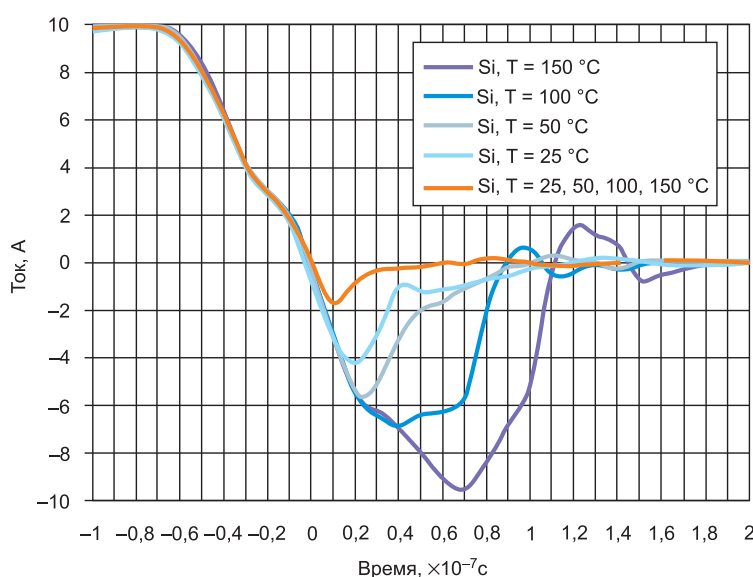


Рис. 5. Зависимость тока обратного восстановления от типа полупроводника и температуры эксплуатации

эти же изделия в высокопрочных корпусах SOT-227. Кроме того, линейка будет расширена за счет выпуска устройств с напряжением пробоя 1700 В, сопротивлением  $R_{DS(ON)}$  не более 25 мОм и максимальным рабочим током до 100 А.

### Диоды Шоттки

Как известно, существенный вклад в потери источников электропитания вносит эффект обратного восстановления мощных высоковольтных диодов. Это особенно актуально для мостовых инверторов, работающих на индуктивную нагрузку. Большие токи при обратном восстановлении диодов также являются причиной возникновения радиопомех, что требует применения экранирования, увеличивающего массу и габариты устройства. Появление диодов с ультрабыстрым восстановлением, таких как FRED, позволяет лишь частично снизить влияние указанных проблем, оптимальным же решением является использование диодов Шоттки на основе карбида кремния.

У кремниевых FRED-диодов главные физические эффекты связаны с неосновными носителями заряда, которые сильно повышают заряд обратного восстановления ( $Q_{RR}$ ), быстро увеличивающийся с ростом температуры, прямого тока и скорости нарастания обратного тока  $di/dt$  (приводит к увеличению потерь на высоких частотах). Например, типовое значение  $Q_{RR}$  при комнатной температуре для таких диодов составляет 160 нКл, а при увеличении температуры перехода до 150 °С — уже 450 нКл. В устройствах на базе кремниевых диодов часто приходится использовать активные или пассивные демпфирующие цепи для ограничения токов обратного восстановления и уменьшения уровня электромагнитных помех, что приводит к усложнению и удорожанию схемы.

Ключевое преимущество карбид-кремниевых диодов Шоттки Microsemi заключается в их исключительных динамических характеристиках, обусловленных отсутствием тока обратного восстановления [4]. Вместо него существует лишь незначительный ток, вызванный зарядом емкости перехода  $Q_C$  и не зависящий от скорости нарастания тока. Для наглядности сравним характеристики выключения SiC-диода Шоттки с кремниевым FRED-диодом при разных температурах эксплуатации (рис. 5).

Из рис. 5 видно, что у быстродействующего Si-диода имеется ярко выраженный эффект обратного восстановления, причем амплитуда пикового тока и временной интервал его протекания имеют существенную температурную зависимость. В свою очередь, форма тока, протекающего через SiC-диод Шоттки, при выключении имеет характер переходного процесса, амплитуда которого не зависит от температуры. Отсутствие токов восстановления обеспечивает практически чистый фронт сигнала. В результате все это приводит к уменьшению прогнозируемых потерь на переключение в типичных применениях

Таблица 2. Основные параметры SiC-диодов Шоттки компании Microsemi

Наименование	Серия диодов	$V_{Rr}$ , В (макс.)	$I_{F}$ , А (сред.)	$V_{F}$ (при $T = 25^\circ\text{C}$ )	$P_{DISS}$ , Вт (макс.)	$Q_c$ , нКл (при $T = 25^\circ\text{C}$ )	Тип корпуса		
<b>Одиночные</b>									
APT10SCE170B	SCE	1700	10	1,5	214	88	TO-247		
APT10SCD120B	SCD	1200	10		125	22	TO-247		
APT10SCD120K			10		125	22	TO-220		
APT20SCD120B			20		208	66	TO-247		
APT20SCD120S			20		208	66	D3PAK		
APT30SCD120B			30		291	200	TO-247		
APT30SCD120S			30		291	200	D3PAK		
APT10SCD65K			650		650	10	63	80	TO-220
APT20SCD65K						20	114	100	TO-220
APT30SCD65B						30	156	150	TO-247
<b>Двойные (с общим катодом)</b>									
APT10SCD120BCT	SCD	1200	2×10	1,5	125	30	TO-247		
APT10SCD65KCT		650			63	80	TO-220		

импульсной силовой электроники (корректорах коэффициента мощности, приводах электродвигателей и т. д.). Более того, сокращаются помехи, создаваемые работой преобразователя на основе SiC-диодов, что опять-таки позволяет упростить фильтры по питанию и уменьшить их размеры.

Еще одно преимущество SiC-диодов перед традиционными кремниевыми — высокая плотность мощности при очень малых размерах кристалла, получаемая вследствие трехкратного выигрыша по проводимости. Следствием этого является повышение КПД, особенно при малых нагрузках и высоких частотах переключения (более 500 кГц), а также уменьшение габаритов внешних индуктивных компонентов (например, в ККМ дроссель повышающего преобразователя является одним из основных компонентов, определяющих массо-габаритные показатели).

Использование в качестве материала основы карбида кремния с более высоким напряжением пробоя позволило значительно повысить уровни рабочих напряжений. Диоды компании Microsemi серий SCE и SCD с диапазоном максимальных рабочих токов от 10 до 30 А и обратными напряжениями 650, 1200 и 1700 В выпускаются в популярных малогабаритных корпусах для планарного и сквозного монтажа (табл. 2).

Корпуса с допустимой температурой эксплуатации 175 °С разработаны с использованием пассивации для повышения надежности в условиях повышенной влажности. Компоненты могут успешно применяться в импульсных источниках питания, инверторах, корректорах коэффициента мощности и другом высоконадежном силовом оборудовании различного назначения [5].

Из основных характеристик стоит отметить малый ток утечки (типичное значение 10 мкА), полученный благодаря широкой запрещенной зоне SiC, а также низкое тепловое сопротивление переход-корпус, не превышающее для ряда моделей 0,7 °С/Вт. Падение напряжения имеет положительный температурный коэффициент, что значительно упрощает использование диодов при их параллельном включении, так как в этом случае не требуются согласующие резисторы для выравнивания их токов.

### Силовые модули с применением SiC-компонентов

Силовые модули на основе карбида кремния получили свое активное развитие в связи с увеличением мощности силовых устройств и нашли применение в схемах, в которых использование дискретных компонентов было неприемлемо из-за их недостаточной мощности либо сложности реализации самой схемы. Переход к созданию высокоинтегрированных модулей позволяет повысить производительность и за счет максимальной плотной компоновки элементов значительно уменьшить габариты конечного устройства, что привело к существенному снижению влияния паразитных элементов на параметры устройства и увеличению эффективности системы в целом [6].

Всю предлагаемую линейку можно разделить на диодные и транзисторные модули. Первая группа состоит из двух отдельных диодов, включаемых как в одном направлении, так

и встречно, либо из четырех диодов, образующих выпрямительный мост (табл. 3, 4).

Все вышесказанное о преимуществах карбид-кремниевых диодов, а именно превосходные рабочие характеристики на повышенных частотах эксплуатации, низкий уровень шума и потерь при переключениях, в полной мере относится и к диодным модулям. Объединение в одном малогабаритном корпусе нескольких элементов позволяет сократить занимаемое ими место на печатной плате. Полученные компоненты идеально подходят для применения в приборах с высокой плотностью монтажа, например в устройствах бесперебойного питания, индукционного нагрева, сварочном оборудовании, высокоскоростных выпрямителях и т. д. Изолированный корпус, непосредственно к которому можно выполнить монтаж радиатора, обладает тепловым сопротивлением переход-корпус примерно 0,8 °С/Вт, напряжение изоляции вывод-корпус составляет 2500 В.

Вторая группа представляет собой транзисторные модули, состоящие либо полно-

Таблица 3. Диодные модули Microsemi на основе SiC

<b>Два диода</b>					
$V_{Rr}$ , В	$I_{F}$ , А (при $T_C = 100^\circ\text{C}$ )	$V_{F}$ , В (при $T_J = 25^\circ\text{C}$ )	Тип корпуса	Конфигурация	
600	20	1,6	SOT-227	APT2X20DC60J	APT2X21DC60J
	30			APT2X30DC60J	APT2X31DC60J
	40			APT2X40DC60J	APT2X41DC60J
	50			APT2X50DC60J	APT2X51DC60J
	60			APT2X60DC60J	APT2X61DC60J
1200	20			APT2X20DC120J	APT2X21DC120J
	40			APT2X40DC120J	APT2X41DC120J
	50			APT2X50DC120J	APT2X51DC120J
	60			APT2X60DC120J	APT2X61DC120J
<b>Четыре диода</b>					
600	20	1,6	SP1	APTDC20H601G	
	40		SP1	APTDC40H601G	
	40		SOT-227	APT40DC60HJ	
1200	10		SOT-227	APT10DC120HJ	
	20		SP1	APTDC20H1201G	
	20		SOT-227	APT20DC120HJ	
	40		SP1	APTDC40H1201G	
	40		SOT-227	APT40DC120HJ	

Таблица 4. Транзисторные SiC-модули компании Microsemi

Силовые IGBT-модули с SiC-диодами						
Повышающий чоппер						
VRRM, В	Тип IGBT	$I_C$ , А (при $T_C = 80^\circ\text{C}$ )	$V_{CE(ON)}$ , В	Тип корпуса	NTC*	Наименование
600	NPT	50	2,1	SOT-227	–	APT50GF60JCU2
1200	NPT	15	3,2	SOT-227	–	APT15GF120JCU2
		25	3,2	SOT-227	–	APT25GF120JCU2
		50	3,2	SP1	Есть	APTF50DA120CT1G
	TRENCH 4 FAST	25	2,05	SOT-227	–	APT25GLQ120JCU2
		40	2,05	SOT-227	–	APT40GLQ120JCU2
Двойной чоппер						
1200	TRENCH 4 FAST	40	2,05	SP3F	Есть	APTGLQ40DDA120CT3G
Силовые MOSFET- и CoolMOS-модули с SiC-диодами						
Одиночный ключ + последовательный FRED- и параллельный SiC-диоды						
VDSS, В	Тип MOSFET	$R_{DS(ON)}$ , мОм	$I_D$ , А (при $T_C = 80^\circ\text{C}$ )	Тип корпуса	NTC*	Наименование
1000	MOS7	65	110	SP6	Опция	APTM100UM65SCAVG
1200		100	86	SP6	Опция	APTM120U10SCAVG
Чоппер						
500	MOS8	65	43	SOT-227	–	APT58M50JCU2
600	CoolMOS	45	38	SOT-227	–	APT50N60JCCU2
		24	70	SP1	Есть	APTC60SKM24CT1G
		18	107	SP4	Есть	APTC60DAM18CTG
900	CoolMOS	120	25	SOT-227	–	APT33N90JCCU2
		60	44	SP1	Есть	APTC90DAM60CT1G
		60	44	SP1	Есть	APTC90SKM60CT1G
1000	MOS8	330	20	SOT-227	–	APT26M100JCU2
		330	20	SOT-227	–	APT26M100JCU3
1200	MOS8	560	15	SOT-227	–	APT20M120JCU2
		560	15	SOT-227	–	APT20M120JCU3
		300	23	SP1	Есть	APTM120DA30CT1G
Полумост + последовательный FRED- и параллельный SiC-диоды						
500	MOS7	38	67	SP4	Есть	APTM50AM38SCTG
		24	110	SP6	–	APTM50AM24SCG
600	CoolMOS	35	54	SP4	Есть	APTC60AM35SCTG
		24	70	SP4	Есть	APTC60AM24SCTG
900	CoolMOS	18	107	SP6	–	APTC60AM18SCTG
		60	44	SP4	Есть	APTC90AM60SCTG
800	CoolMOS	150	21	SP4	Есть	APTC80A15SCTG
		100	32	SP4	Есть	APTC80A10SCTG
		75	43	SP6	–	APTC80AM75SCG
1000	MOS7	130	49	SP6	–	APTM100A13SCG
Мост + последовательный FRED- и параллельный SiC-диоды						
500	MOS7	75	34	SP4	Есть	APTM50HM75SCTG
600	CoolMOS	70	29	SP4	Есть	APTC60HM70SCTG
		45	38	SP4	Есть	APTC60HM45SCTG
800	CoolMOS	290	11	SP4	Есть	APTC80H29SCTG
900	CoolMOS	120	23	SP4	Есть	APTC90H12SCTG
1000	MOS7	450	14	SP4	Есть	APTM100H45SCTG
Три полумоста						
600	CoolMOS	24	87	SP6-P	Есть	APTC60TAM21SCTPAG
1000	MOS7	350	50	SP6-P	Есть	APTM100TA35SCTPG
Силовые модули на основе SiC MOSFET						
VDSS, В	Технологии	$R_{DS(ON)}$ , мОм	$I_D$ , А (при $T_C = 80^\circ\text{C}$ )	Тип корпуса	NTC*	Наименование
Трехуровневый инвертор T-типа						
600/1200	IGBT и SiC MOSFET	110	20	SP3F	Есть	APTMС120HR11CT3G
		40	50	SP3F	Есть	APTMС120HRM40CT3G
Трехуровневый инвертор						
600	SiC MOSFET	110	20	SP3F	Есть	APTMС60TL11CT3AG
		55	40	SP3F	Есть	APTMС60TLM55CT3AG
		14	160	SP6	–	APTMС60TLM14CAG
Полумост + параллельный SiC-диод						
1200	SiC MOSFET	55	40	SP1	Есть	APTMС120AM55CT1AG
		25	80	SP3	Есть	APTMС120A25CT3AG
		20	108	SP1	Есть	APTMС120AM20CT1AG
		16	102	D3	–	APTMС120AM16CD3AG
		12	150	SP3	Есть	APTMС120AM12CT3AG
		9	200	SP3	Есть	APTMС120AM09CT3AG
		8	200	D3	–	APTMС120AM08CD3AG
1700		60	40	SP1	Есть	APTMС170AM60CT1AG
		30	80	SP1	Есть	APTMС170AM30CT1AG
Три полумоста + параллельные SiC-диоды						
1200	SiC MOSFET	33	60	SP6-P	Есть	APTMС120TAM33CTPAG
		17	100	SP6-P	Есть	APTMС120TAM17CTPAG
		12	150	SP6-P	Есть	APTMС120TAM12CTPAG
Повышающий чоппер						
1200	SiC MOSFET	40	50	SOT-227	–	APT50MC120JCU2

Примечание: \* – встроенный датчик температуры с отрицательным температурным коэффициентом.

стью из SiC-элементов, либо с применением таковых для улучшения ключевых характеристик разрабатываемого устройства. Карбидокремниевые силовые модули для промышленного диапазона температур производства компании Microsemi, выполненные в различных электрических конфигурациях, предлагаются в низкопрофильных корпусах (рис. 6). В большинстве из них используется подложка из нитрида алюминия. Она обеспечивает наличие электрической изоляции схемы модуля от теплоотвода и улучшает теплопередачу к системе охлаждения модуля. При этом некоторые модули содержат интегрированные датчики температуры, позволяющие обеспечить защиту от превышения максимальной температуры эксплуатации. Предельное рабочее напряжение достигает 1700 В. В табл. 4 приведены основные технические характеристики и доступные электрические конфигурации предлагаемых устройств (цветом выделены новинки 2014 г.).

Главными особенностями изделий компании Microsemi являются высокоскоростная коммутация с низкими потерями, малая входная емкость, незначительные требования к схемам драйверов и минимальная паразитная индуктивность. Все это позволяет создавать высокоэффективные силовые устройства. Выпускаемые устройства применяются в импульсных источниках питания, высоковольтных ККМ и умножителях напряжения, мощных инверторах, преобразователях для солнечных батарей, промышленных электроприводах и в другом силовом оборудовании.

В заключение представим некоторые новинки, произведенные в 2014 году. Прежде всего, стоит отметить MOSFET-модули АРТМС170АМ60СТ1АГ и АРТМС170АМ30СТ1АГ, выполненные по полумостовой конфигурации, с максимальным напряжением сток-исток 1700 В, рабочим током 40 и 80 А и сопротивлением  $R_{DS(ON)}$  ключевых элементов не более 60 и 30 мОм соответственно. Они изготавливаются в высокопрочном низкопрофильном корпусе SP1 с размерами 51,6×40,8×11,5 мм, предназначенном для сквозного монтажа. Его тепловое сопротивление  $R_{thJC}$  (переход-корпус) не превышает 0,36 °С/Вт [7].

Отличительные особенности и преимущества применения данных модулей:

- очень малая индуктивность рассеяния;
- кельвин-эмиттеры, облегчающие управление;
- встроенный термистор для мониторинга температуры;
- высокая степень интеграции;
- превосходные рабочие характеристики на высоких частотах переключения;
- непосредственный монтаж на теплоотвод (изолированный корпус).

Также интересен модуль АРТМС120АМ09СТ3АГ, отличающийся очень низким значением  $R_{DS(ON)}$  (всего 9 мОм) и максимальным показателем тока стока 200 А (при температуре  $T_C = 80^\circ\text{C}$ ) и 295 А при комнатной. Он доступен для заказа в корпусе SP3F с размерами 73,4×42,5×12,0 мм и предназначен, прежде всего,

## Заклучение

Повышение производительности и надежности эксплуатации с одновременным уменьшением массо-габаритных показателей — такова причина роста популярности устройств на основе SiC. Преимущества использования приборов на основе карбида кремния очевидны — одной только заменой широко применяемых кремниевых устройств, не затрагивая схему, можно добиться значительного улучшения ключевых показателей, снизить уровень потерь и обеспечить надежное функционирование при повышенных температурах. Отработанные технологии производства компании Microsemi, высокий уровень стандартизации, максимальная гибкость и адаптируемость выпускаемой продукции к различным применениям дают возможность выбора оптимального решения по соотношению цена/производительность.

## Литература

1. Обжерин Е. Силовые модули на карбиде кремния компании Infineon // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2009. № 7.
2. Каталог Microsemi Power Portfolio 2014–2015. [www.microsemi.com/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=14813](http://www.microsemi.com/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=14813).
3. Technical Datasheet. Silicon carbide power MOSFET APT40SM120. April 2013. [www.microsemi.com](http://www.microsemi.com).
4. Полищук А. Полупроводниковые приборы на основе карбида кремния — настоящее и будущее силовой электроники // Компоненты и технологии. 2004. № 8.
5. Technical Datasheet. Zero recovery silicon carbide Schottky diode APT10SCE170B. March 2014. [www.microsemi.com](http://www.microsemi.com).
6. Верхулевский К. Новые силовые модули компании Microsemi на основе карбида кремния // Компоненты и технологии. 2013. № 4.
7. Technical Datasheet. Phase leg SiC MOSFET power module APTMC170AM60CT1AG. June 2014. [www.microsemi.com](http://www.microsemi.com).
8. Technical Datasheet. Triple phase leg SiC MOSFET power module APTMC120TAM33CTPAG. May 2014. [www.microsemi.com](http://www.microsemi.com).



Рис. 6. Внешний вид SiC транзисторных модулей компании Microsemi

для использования в сварочном оборудовании, импульсных источниках питания и драйверах электродвигателей. Встроенный датчик температуры с отрицательным температурным коэффициентом обеспечивает безопасное и длительное функционирование.

Модели АРТМС120ТАМ33СТРАГ, АРТМС120ТАМ17СТРАГ и АРТМС120ТАМ12СТРАГ содержат в своем составе по три полумоста с подсоединенным к каждому ключевому элементу параллельным SiC-диодом. Изготавливаемые на основе SiC MOSFET, они рассчитаны на максимальное напряжение исток-сток 1200 В и ток стока до 150 А [8].

Отличительные особенности данных модулей:

- низкое значение сопротивления во включенном состоянии  $R_{DS(ON)}$  (от 12 до 33 мОм);
- высокая температурная стабильность;
- изолированный корпус, облегчающий установку радиатора;
- встроенный термистор для измерения температуры модуля;
- очень малая индуктивность рассеяния;
- малое тепловое сопротивление кристалл-корпус (0,1 °C/Вт).