

Новые силовые модули компании Microsemi на основе карбида кремния

Константин ВЕРХУЛЕВСКИЙ
info@icquest.ru

Современный уровень развития силовой электроники характеризуется ростом уровня интеграции наряду с обеспечением высочайших показателей надежности и безотказности, а также неуклонным увеличением плотности мощности высоковольтных модулей при одновременном уменьшении их массо-габаритных показателей. Для улучшения рабочих характеристик в последнее время широко применяются полупроводниковые материалы с большой шириной запрещенной зоны. В статье рассматриваются преимущества использования карбид-кремниевых модульных решений на примере новинок от компании Microsemi.

Введение

В настоящее время существует два основных подхода к проектированию устройств силовой электроники: на дискретных компонентах и с применением модулей. В первом случае наличие больших токов и напряжений, влияние монтажных и конструктивных паразитных емкостей и индуктивностей, а также использование высокой частоты коммутации (от нескольких кГц до МГц) силовых цепей приводит к существенным потерям энергии в этих системах и, как следствие, к снижению КПД.

Силовые модули 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 силовых модулей, сочетающих в себе последние достижения электроники и силовой электротехники, позволяет повысить производительность и за счет максимально плотной компоновки элементов значительно уменьшить габариты конечного устройства [1]. Следствием этого является существенное уменьшение влияния паразитных элементов на параметры устройства и увеличение эффективности системы в целом.

Типовые модули состоят из силовой сборки на основе диодов различного типа (диодов стандартного быстрого действия, диодов Шоттки, диодов с быстрым восстановлением и т. д.), тиристоров, MOSFET- и IGBT-транзисторов, размещенных на керамической высокоплотной подложке, которая обеспечивает высокое напряжение изоля-

ции и хороший теплоотвод. Подложка размещается на металлическом (медном или алюминиевом) радиаторе, который создает необходимый теплообмен с окружающей средой.

Преимущества использования силовых модулей по сравнению с дискретными компонентами очевидны. Во-первых, это высокая плотность мощности. В силовых модулях используются открытые кристаллы, что увеличивает интеграцию устройства, таким образом, количество внешних связей значительно снижается. Все внутренние связи максимально коротки, что приводит к минимизации паразитных активных и реактивных элементов. Это, в свою очередь, обеспечивает безопасную работу на высоких частотах, повышает КПД и снижает возможные перегрузки по напряжению при включении устройства. А снижение перегрузок уменьшает уровень электромагнитных помех, соответственно требования к внешним фильтрам становятся менее жесткими.

Во-вторых, минимизация тепловых сопротивлений. Кристаллы, размещенные на подложке, гальванически изолированы от платы основания. В качестве подложки используется изолированный металл или керамика (оксид или нитрид алюминия). Тип и количество полупроводниковых кристаллов тщательно подбирают исходя из электронной схемы и минимизации температурных сопротивлений, а также цены изделия. Важным фактором является повторяемость параметров продукции. Поскольку в процессе производства модуля все внутренние соединения задаются маской, достигается исключительная повторяемость как термических, так и электрических параметров, не только для отдельной партии, но и в пределах всей серии. Для

специальных применений полупроводниковые кристаллы могут быть предварительно отсортированы по близости параметров, например по пороговому напряжению или току утечки, с целью получения большей эффективности. В конечном итоге интеграция элементов уменьшает как размер, так и вес силового модуля. Благодаря компактности модуля развязывающий конденсатор может быть присоединен в непосредственной близости от шины питания, тем самым уменьшается паразитная индуктивность между шиной питания и модулем.

В результате отказа от внешних дискретных элементов и сопутствующих деталей цена, а также затраты на сборку всего изделия уменьшаются. Как следствие, упрощение разработки конечного устройства при использовании модуля способствует уменьшению времени выхода разрабатываемого устройства на рынок.

В итоге все эти преимущества и достоинства обеспечивают наилучшую эффективность и надежность силовых модулей и делают обоснованным использование готовых модулей по сравнению со сборками из дискретных элементов.

Внедрение широкозонных полупроводниковых материалов

За последние несколько лет в электронике наметилась отчетливая тенденция применения при проектировании силовых приборов новых широкозонных полупроводниковых материалов (карбида кремния, нитрида галлия, нитрида алюминия и др.). Уникальные свойства этих полупроводниковых материалов (большая ширина запрещенной зоны, высокие значения подвижности носителей

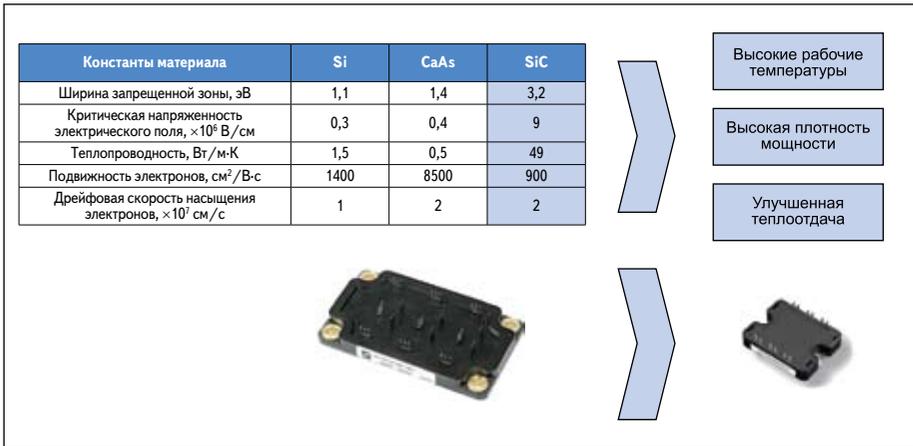


Рис. 1. Преимущества внедрения SiC-технологий

заряда и их скоростей насыщения, большие коэффициенты теплопроводности и т. д.) обеспечивают создание на их основе приборов с рекордными значениями мощности, напряжения и тока.

Одним из наиболее перспективных и распространенных материалов является карбид кремния, который широко используется для улучшения рабочих характеристик модульных конструкций, а именно быстродействия, предельных коммутлируемых токов и напряжений, статических и динамических потерь. Приборы силовой электроники на основе SiC позволяют радикально уменьшить габариты и массу преобразовательного оборудования, увеличить надежность работы за счет более высоких частот преобразования, более высокой температуры перехода и упрощенной системы охлаждения [2]. Силовые модули на основе SiC востребованы в нефтедобывающем оборудовании, энергетике, автомобильной электронике, аэрокосмической и военной технике и предназначены для использования в импульсных источниках питания, высоковольтных корректорах коэффициента мощности (ККМ), источниках бесперебойного питания (ИБП) и преобразователях для солнечных батарей, промышленных электроприводах и высоковольтных умножителях напряжения. Основные характеристики SiC, позволяющие добиться реального улучшения параметров приборов по сравнению с традиционными кремнием и арсенидом галлия, отмечены на рис. 1.

Отметим ряд ключевых особенностей карбид-кремниевых приборов:

- 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.
- Малое удельное сопротивление в открытом состоянии в сочетании с высокой плотностью тока (до 1000 А/см²) и теплопроводностью способствует уменьшению габаритов силовых приборов.

- Высокая стабильность характеристик и незначительное влияние изменения рабочих температур обеспечивает высокую долговременную надежность изделий.
- Высокая рабочая температура (более +500 °С) и радиационная стойкость делают карбид кремния практически незаменимым материалом для разработки полупроводниковых приборов, работающих в жестких условиях эксплуатации, в частности для военного и космического применения.
- Большая ширина запрещенной зоны приводит к уменьшению величины тока утечки (менее 70 мкА при +200 °С) при повышенной температуре кристалла.
- Высокая теплопроводность SiC снижает тепловое сопротивление кристалла (по сравнению с Si почти в два раза).
- Более высокое пробивное напряжение по сравнению с кремнием, что позволяет создавать приборы с минимальными габаритами.

MOSFET-приборы отличаются малыми статическими и динамическими потерями, незначительными затратами на управление, крайне небольшим временем переключения. Традиционно дискретные и модуль-

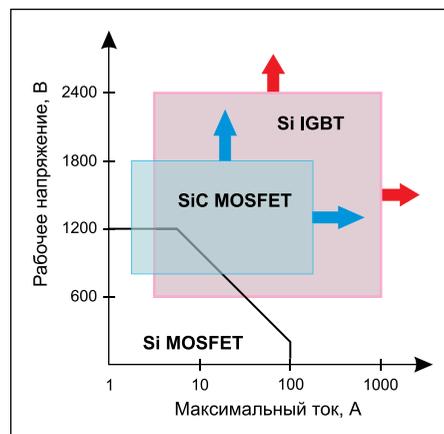


Рис. 2. Область применения MOSFET-модулей на основе SiC

ные MOSFET-компоненты занимали нишу в диапазоне рабочих токов до 50 А и напряжений не более 200 В. Совершенствование технологии изготовления MOSFET, в частности использование карбида кремния, расширило область применения приборов этого класса в диапазоне коммутлируемых напряжений от 600 до 1200 В. И при мощности до 10 кВт MOSFET-модули постепенно заменяют устройства, выполняемые на силовых биполярных транзисторах (рис. 2).

Новое семейство карбид-кремниевых силовых модулей компании Microsemi

Номенклатура карбид-кремниевых продуктов на рынке силовой электроники постоянно расширяется. Компании-производители начинают массово выпускать SiC-компоненты, позволяющие добиться улучшенных показателей, как в дискретном, так и в модульном исполнении. Одним из признанных лидеров является компания Microsemi — известный разработчик полупроводниковых устройств, специализирующийся в области производства высоконадежных силовых дискретных устройств, модулей и интегральных схем для широкого круга применений. При изготовлении используются кремниевый, SiC и GaN технологические процессы [3].

В настоящее время компания Microsemi производит широкий спектр стандартных силовых полупроводниковых модулей, а также заказных специализированных модулей военного и промышленного назначения, разрабатываемых по индивидуальному заказу. Каталог силовой продукции компании за 2012 год содержит следующие силовые модули (в скобках указано количество типов изделий) [4]:

- диодные модули (642);
- интеллектуальные модули (6);
- MOSFET-модули (271);
- тиристорные модули (54);
- IGBT-модули (410);
- комбинированные IGBT/MOSFET-модули (20);
- модули на основе карбида кремния (92).

Новая линейка компонентов, в большинстве своем не имеющих аналогов, разработана для применения в мощных импульсных источниках бесперебойного питания, электроприводах, источниках бесперебойного питания, солнечных инверторах, нефтегазаведке и в других мощных высоковольтных промышленных разработках, требующих высокого уровня эксплуатационных характеристик и надежности. Представляемые карбид-кремниевые силовые модули предназначены для эксплуатации в промышленном диапазоне рабочих температур, выполнены по различным электрическим конфигурациям и доступны в низкопрофильных малогабаритных корпусах.

Основные особенности изделий семейства: высокая скорость переключения, низкие потери коммутации, малая входная ем-

Таблица. Основные параметры новых MOSFET-модулей на основе SiC

Наименование	Применяемые технологии	V_{CES} , В	I_{Dr} , А при $T_C = 80^\circ\text{C}$	$R_{DS(on)}$, мОм	NTC*	Корпус
Комбинированные модули с фиксированной нейтральной точкой						
ARTMC120HR11CT3G	IGBT&SiC MOSFET	600	20	110	Есть	SP3F
ARTMC120HRM40CT3G		1200	50	40	Есть	SP3F
Модули с фиксированной нейтральной точкой						
ARTMC60TL11CT3AG	SiC MOSFET	600	20	110	Есть	SP3F
ARTMC60TLM55CT3AG			40	55	Есть	SP3F
ARTMC60TLM20CT3AG			110	20	Есть	SP3F
ARTMC60TLM14CAG			160	14	Нет	SP6
Модули с полумостовой конфигурацией						
ARTMC120AM55CT1AG	SiC MOSFET	1200	40	55	Есть	SP1
ARTMC120AM20CT1AG			100	20	Есть	SP1
ARTMC120AM08CD3AG			185	8	Нет	D3
Повышающие модули						
APT50MC120JCU2	SiC MOSFET	1200	50	40	Нет	SOT-227
APT100MC120JCU2			100	20	Нет	SOT-227

Примечание. * Датчик температуры с отрицательным температурным коэффициентом.

кость, незначительные требования к схеме драйвера, малая высота корпуса и минимальная паразитная индуктивность, что позволяет создавать высокоэффективные силовые устройства. Новые модули состоят преимущественно из карбид-кремниевых MOSFET-транзисторов и диодов. Для улучшения динамических характеристик, а именно уменьшения потерь на включение транзистора в два раза, вместо широко применяемых диодов с быстрым восстановлением (FRED) используются SiC-диоды. Встроенные диоды обладают нулевым временем обратного восстановления, минимальными потерями на включение и высокой температурой перехода ($+175^\circ\text{C}$). Они способны работать с напряжением до 1200 В. Интегрированный датчик температуры (в 7 из 11 модулей) обеспечивает защиту от перегрева корпуса.

Основные параметры новых MOSFET-модулей представлены в таблице.

На рис. 3 показана типовая внутренняя структура силового модуля, который производит компания Microsemi. Основание, подложка и силовые полупроводники — главные конструктивные составляющие модулей, выбор которых влияет непосредственно на рабочие характеристики [5].

Рынок силовой преобразовательной техники требует непрерывного повышения мощности электронных модулей и при этом — уменьшения габаритов. Основным способом снижения размеров модуля одновременно с повышением его мощности является улучшение тепловых характеристик, снижение значения теплового сопротивления. Замена ранее используемого медного основания модуля на композитный материал (AlSiC) улучшает температурные характеристики модуля и способствует повышению устойчивости к термоциклированию. Композитный материал и подложка из высокотеплопроводного диэлектрика (AlN) имеют практически одинаковый коэффициент температурного расширения и оптимальны для создания высоконадежных силовых модулей. Помимо этого, использование сплава алюминия с карбидом кремния приводит к уменьшению веса изделия, так как он почти в три раза легче меди.

Подложка обеспечивает наличие электрической изоляции схемы модуля от теплоотвода и улучшает теплопередачу к системе охлаждения модуля. При изготовлении подложки применяется технология DBC (direct bond copper, прямая металлизация меди), при которой на диэлектрические печатные

платы из высокотеплопроводного материала (Al_2O_3 , AlN, ВеО и т.д.) диффузионным методом наносятся медные шины необходимой топологии толщиной 0,1–0,4 мм, предназначенные для установки силовых кристаллов. Печатные платы, выполненные по DBC-технологии, являются отличным решением для отвода большого количества тепла от компонентов схемы, где протекают большие токи (10–50 А и выше).

В модулях нового семейства в качестве материала подложки используется нитрид алюминия — материал, имеющий низкое тепловое сопротивление и достаточно высокое напряжение изоляции по сравнению с Al_2O_3 . Хорошая теплопроводность AlN позволяет не только улучшить тепловые характеристики модулей, но и получить большее значение допустимой плотности тока и, соответственно, мощности. Функциональные полупроводниковые элементы, которые рассеивают большую мощность, размещаются непосредственно на подложке для внешнего охлаждения, а драйверы и элементы защиты, потребляющие меньшую мощность, монтируются на поверхность платы, размещенной внутри корпуса.

Клеммы используются как с винтовым соединением, так и для пайки в зависимости от типа корпуса. Как уже было отмечено выше, корпуса в этой линейке применяются стандартные, но для заказчиков существует возможность приобретения специализированных изделий, адаптированных под требования разработчика. Для разработчиков доступны модули, рассмотренные далее.

Модули, построенные с применением повышающей «чопперной» конфигурации

Эти приборы выполнены в низкопрофильных корпусах SOT-227 размерами $38 \times 25,2 \times 11,8$ мм и массой 29,2 г. Основные сферы применения: управление двигателями постоянного и переменного тока, импульсные источники питания и корректоры коэффициента мощности. В состав серии входят модули с максимальным обратным напряжением 1200 В и током 50 А (APT50MC120JCU2)

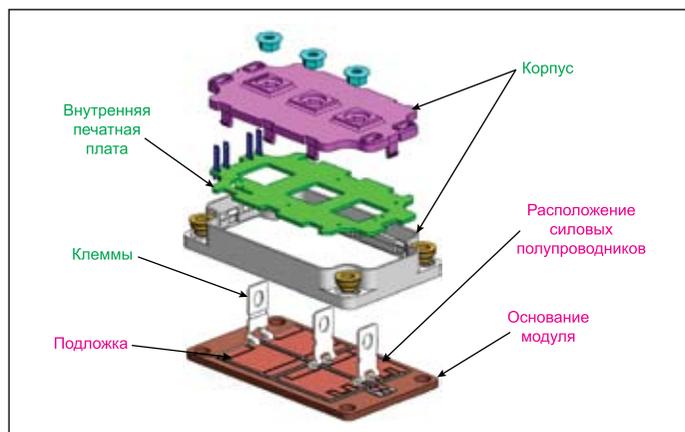


Рис. 3. Внутренняя структура модулей Microsemi

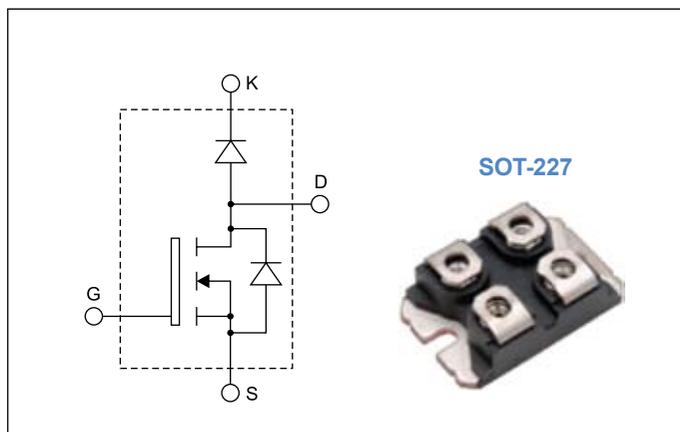


Рис. 4. Топология и внешний вид модулей APT50MC120JCU2 и APT100MC120JCU2

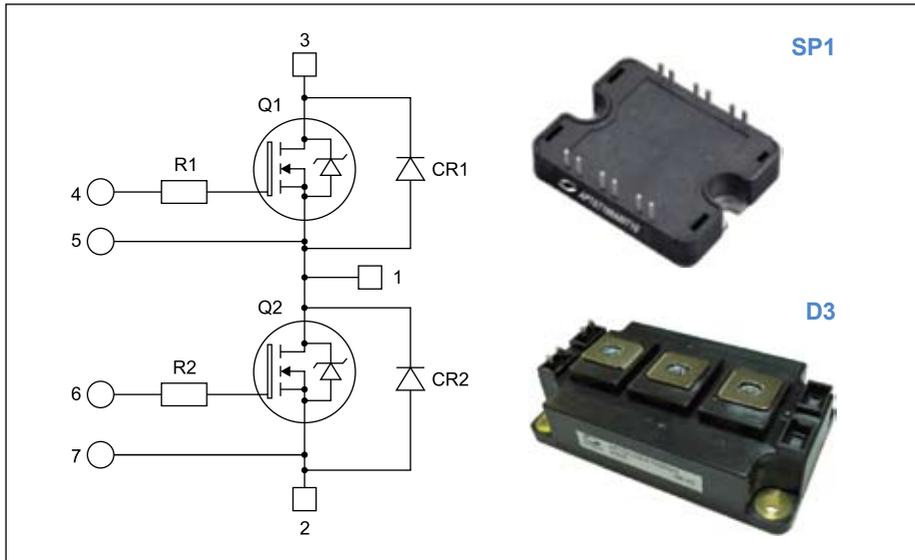


Рис. 5. Топология и внешний вид модулей АРТМС120АМ08СД3АГ, АРТМС120АМ20СТ1АГ и АРТМС120АМ55СТ1АГ

и 100 А (АРТ100МС120ЈС2) [6]. Реализованная топология и внешний вид силовых модулей приведены на рис. 4.

Особенности и преимущества использования:

- Низкое значение сопротивления во включенном состоянии $R_{DS(ON)}$: 20 и 40 мОм.
- Стабильная работа при изменении рабочей температуры.
- Высокая степень интеграции.
- Работа на высокой частоте.
- Малое тепловое сопротивление R_{thJC} : не более 0,8 °С/Вт.
- Очень малая индуктивность рассеяния.
- Изолированный корпус облегчает установку радиатора.
- Напряжение изоляции корпус/вывод: 2500 В.
- Время включения/выключения: 19/30 нс.

Силовые модули АРТМС120АМ08СД3АГ, АРТМС120АМ20СТ1АГ и АРТМС120АМ55СТ1АГ

Эти модули представляют собой однофазную полумостовую конфигурацию (максимальное напряжение сток-исток — 1200 В, рабочий ток — от 40 до 200 А) [7]. Данные преобразователи предназначены для применения в сварочном оборудовании, импульсных источниках питания, источниках бесперебойного питания и драйверах мощных двигателей. Изготавливаются в корпусах SP1 и D3 с размерами 51,6×40,8×11,5 мм и 108×62×31 мм соответственно, для второго корпуса крепление модулей к силовым шинам осуществляется винтами М6.

Внешний вид модулей и используемая топология показаны на рис. 5. В качестве аналога из представленных на рынке можно отметить компонент компании Cree — силовой модуль CAS100Н12АМ1 со следующими параметрами: напряжение — 1,2 кВ; схема —

полумост, ток до 165 А при температуре +25 °С, $R_{DS(ON)}$ — 16 мОм.

Особенности силовых модулей Microsemi:

- Низкое значение сопротивления во включенном состоянии.
- Высокая прочность.
- Кельвин-эмиттеры для облегчения управления.
- Непосредственный монтаж на теплоотвод (изолированный корпус).
- Малое тепловое сопротивление кристалл – корпус (0,18 °С/Вт).
- Высокая производительность на больших значениях частоты переключения.
- Высокая температурная стабильность.

- Легкость параллельного соединения модулей для уменьшения напряжения насыщения.

Силовые модули АРТМС60ТЛМ14САГ, АРТМС60ТЛМ20СТ3АГ, АРТМС60ТЛМ55СТ3АГ и АРТМС60ТЛ11СТ3АГ

Основным назначением следующих компонентов являются источники бесперебойного питания и схемы солнечных инверторов. Силовые модули АРТМС60ТЛМ14САГ, АРТМС60ТЛМ20СТ3АГ, АРТМС60ТЛМ55СТ3АГ и АРТМС60ТЛ11СТ3АГ — трехуровневые инверторы с фиксированной нейтральной точкой, рассчитанные на напряжение 600 В и ток от 20 до 160 А [8]. Они выпускаются в низкопрофильных корпусах SP3F и SP6 с размерами 73,4×42,5×12 мм и 108×62×16 мм соответственно (рис. 6). Небольшая высота обеспечивает минимальную паразитную индуктивность.

Преимущества:

- высокая температурная стабильность;
- сверхмалое время обратного восстановления: не более 220 нс;
- малые токи утечки: до 2 мкА;
- очень малая индуктивность рассеяния;
- кельвин-эмиттеры для облегчения управления;
- встроенный датчик для контроля температуры;
- малое тепловое сопротивление кристалл – корпус: 0,15 °С/Вт;
- широкий диапазон изменения номинальных значений тока и напряжения.

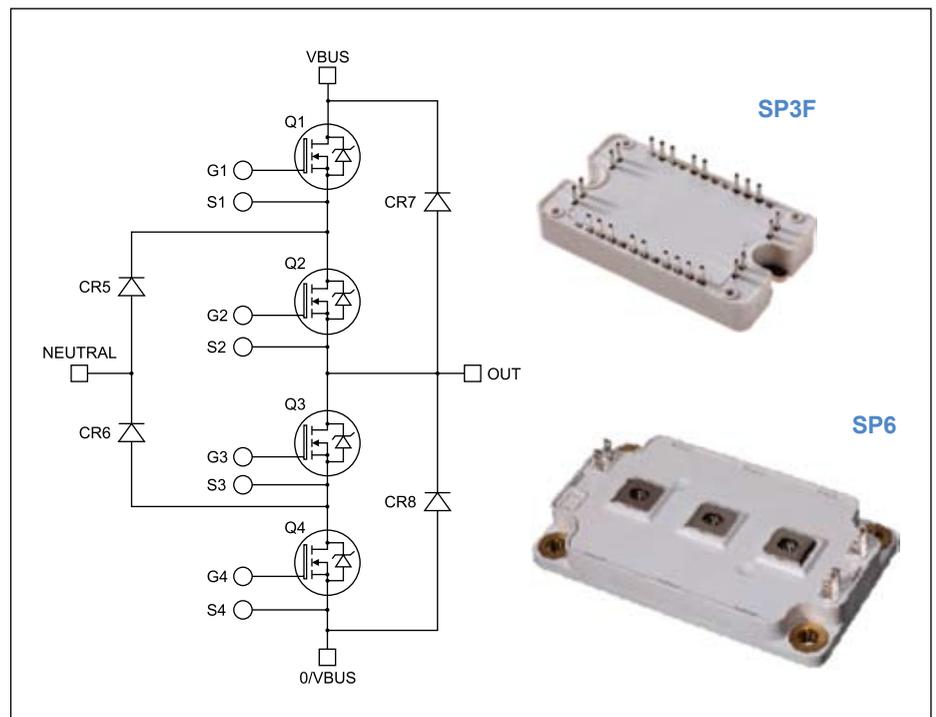


Рис. 6. Модули АРТМС60ТЛМ14САГ, АРТМС60ТЛМ20СТ3АГ, АРТМС60ТЛМ55СТ3АГ и АРТМС60ТЛ11СТ3АГ

Комбинированные IGBT/MOSFET-модули APTMC120HRM40CT3G и APTMC120HR11CT3G

Комбинированные IGBT/MOSFET-модули APTMC120HRM40CT3G и APTMC120HR11CT3G — это преобразователи с фиксированной нейтральной точкой. Их рабочее напряжение 600/1200 В, а ток — 20–50 А [9]. Они обладают всеми преимуществами, описанными ранее для других модулей, и выпускаются в низкопрофильном корпусе SP3F.

Используемая технология Fast Trench+Field Stop IGBT3 дает существенное улучшение характеристик благодаря оптимизации основных элементов вертикальной структуры чипа: базы n -слоя n -Field Stop, предназначенного для повышения напряжения пробоя, и эмиттера. В результате снижается суммарное значение потерь в широком диапазоне частот, обеспечивается более плавный характер переключения, а чипы занимают меньшую площадь, что позволяет снизить себестоимость продукции. Основные области применения — источники бесперебойного питания и преобразователи солнечной энергии.

Перечислим основные характеристики полупроводниковых составляющих модуля на примере APTMC120HR11CT3G (рис. 7).

- Q1 и Q2 — SiC MOSFET-транзисторы:
 - низкое значение сопротивления во включенном состоянии $R_{DS(ON)}$: 110 мОм;
 - максимальное рабочее напряжение: 1200 В;
 - максимальный ток: 25 А при $T_C = 25^\circ\text{C}$;
 - управляющее напряжение на затворе: $-5/+25$ В;
 - малый ток утечки: 250 нА;
 - малое тепловое сопротивление кристалл – корпус: 1,3 $^\circ\text{C}/\text{Вт}$.
- Q3 и Q4 IGBT-транзисторы, выполненные по технологии Trench + Field Stop IGBT3:
 - напряжение пробоя V_{CES} : 600 В;
 - максимальный постоянный ток коллектора: 32 А при $T_C = 25^\circ\text{C}$;
 - напряжение насыщения $V_{CE(sat)}$: 1,5 В при $T_C = 25^\circ\text{C}$;
 - малый хвостовой ток;
 - частота переключения: до 20 кГц.
- CR1–CR4 — SiC-диоды Шоттки:

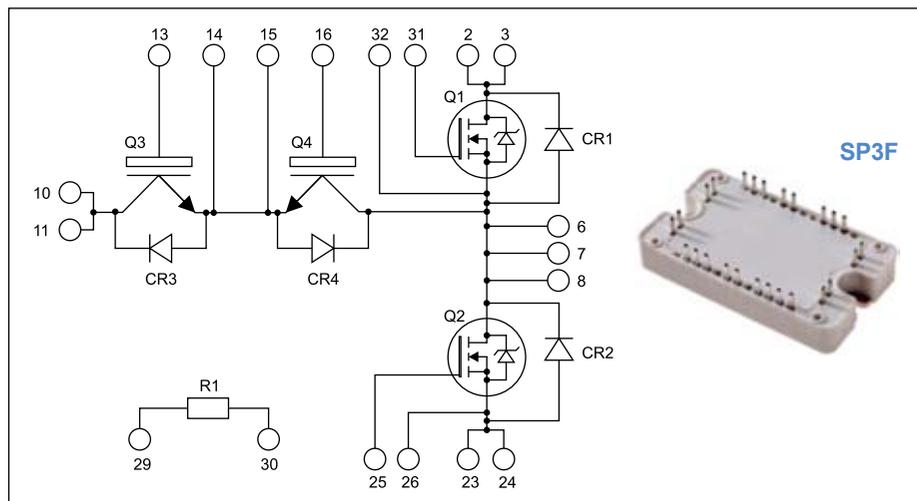


Рис. 7. Внешний вид и конфигурация модулей APTMC120HRM40CT3G и APTMC120HR11CT3G

- практически нулевое время обратного восстановления;
- максимальное обратное напряжение: 1200 В (для CR1, CR2) и 600 В (для CR3, CR4);
- максимальный прямой постоянный ток: 10 А при $T_C = 100^\circ\text{C}$;
- прямое напряжение: 1,6 В при $I_{пр} = 10$ А и $T_j = 25^\circ\text{C}$;
- тепловое сопротивление кристалл – корпус: 1,8 $^\circ\text{C}/\text{Вт}$ (для CR1, CR2) и 2,4 $^\circ\text{C}/\text{Вт}$ (для CR3, CR4).

Заключение

Использование модульной архитектуры совместно с применением новых широкозонных полупроводников — очевидный путь улучшения ключевых показателей устройств силовой электроники. Повышение производительности и надежности эксплуатации с одновременным уменьшением массогабаритных показателей — причина роста популярности модулей на основе SiC.

Отработанные технологии производства компании Microsemi, высокий уровень стандартизации, максимальная гибкость и адаптируемость выпускаемой продукции к различным применениям позволяют выбрать оптимальное решение по соотношению цена/производительность. ■

Литература

1. Флоренцев С. Современное состояние и прогноз развития приборов силовой электроники // Современные технологии автоматизации. 2004. № 2.
2. O'Neill M. Карбид-кремниевый MOSFET бросает вызов IGBT // Электронные компоненты. 2008. № 12.
3. www.microsemi.com
4. Петропавловский Ю. Параметры и особенности современных силовых IGBT- и FRED-модулей корпорации Microsemi // Силовая электроника. 2012. № 4.
5. Каталог Microsemi Power Portfolio 2012–2013. <http://www.microsemi.com/design-support/product-brochures#power-products>
6. APT50MC120JCU2: ISOTOP Boost chopper SiC MOSFET + SiC chopper diode Power module. Datasheet. Nov. 2012. www.microsemi.com
7. APTMC120AM08CD3AG: Phase leg MOSFET Power Module. Datasheet. Nov. 2012. www.microsemi.com
8. APTMC60TLM14CAG: Three level inverter SiC MOSFET Power Module. Datasheet. Nov. 2012. www.microsemi.com
9. APTMC120HR11CT3G: Phase Leg & Dual Common Emitter Power Module. Datasheet. Nov. 2012. www.microsemi.com