

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА, ФИРМЫ-ПРОИЗВОДИТЕЛИ

И.Кокорева

Силовая электроника – одна из бурно развивающихся областей электроники в XXI веке. Наиболее перспективным направлением являются интеллектуальные силовые компоненты: интегрированные силовые микросхемы, ключи и модули. Это направление стремительно развивается благодаря успехам в совершенствовании технологии изготовления и значительному улучшению параметров мощных полевых транзисторов (MOSFET), биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), силовых драйверов более высокой степени интеграции. Интеграция схем управления (драйверов, контроллеров) в силовые ключи и затем в исполнительные устройства и механизмы стала и необходимым, и оправданным шагом. В настоящее время, а тем более в будущем, интеллектуальным силовым компонентам в силовой электронике альтернативы не предвидится.

Силовая электроника (Power Electronics) базируется на ключевых режимах преобразования энергии и связана с современными методами анализа и синтеза электронных цепей, которые обеспечивают эффективное преобразование, управление и регулирование электрической энергии с помощью силовых полупроводниковых приборов.

Основными приборами силовой электроники в области коммутируемых токов до 50 А являются:

- диоды (Diodes);
- тиристоры (Thyristors, SCR);
- биполярные транзисторы (BPT);
- биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT);
- полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET);
- силовые интегральные схемы (Power IC);
- интеллектуальные силовые интегральные схемы (Smart Power IC).

Основные приборы силовой электроники в области коммутируемых токов более 50 А:

- силовые модули на базе биполярных транзисторов;
- силовые модули на базе IGBT;
- тиристоры;
- запираемые тиристоры (GTO, IGCT);
- диоды.

Самыми распространенными приборами в диапазоне до 50 А являются полевые транзисторы с изолированным затвором – MOSFET. Эти приборы обладают малыми статическими и динамическими потерями, незначительными затратами на управление, крайне небольшими временами переключения и работают на частотах до 1 МГц. Это позволило практически полностью вытеснить из низковольтных преобразовательных устройств (< 200 В) все остальные типы силовых полупроводниковых приборов. Совершенствование технологии изготовления MOSFET расширило область применения приборов этого класса в диапазоне коммутируемых напряжений 600–1000 В и при мощностях до 10 кВт MOSFET заменили силовые биполярные транзисторы.

В области средних напряжений (500–600 В и выше) предпочтительны биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistors).

В настоящее время IGBT обеспечивают коммутацию токов до 3600 А и напряжений до 6,5 кВ. При этом времена переключения биполярных транзисторов с изолированным затвором лежат в диапазоне 200–400 нс.

МОП-управляемые приборы стимулировали развитие силовых модулей, в которых ключевые, а в некоторых случаях и информационные элементы, соединяются методами пленочной технологии на общей теплопроводящей изолирующей подложке, образуя всю или часть силовой схемы преобразовательного устройства.

Силовые модули разделяются на обычные (стандартные) IGBT-модули и интеллектуальные. Стандартные модули выпускаются в одно-, двух-, четырех- и шестиключевом исполнении с обратными быстровосстанавливающимися диодами (FRD – Fast Recovery Diodes) или без них. Интеллектуальные силовые модули (IPM – Intelligent Power Modules) кроме силовой части схемы преобразователя (мостового одно- или трехфазного выпрямителя,



мостового инвертора) содержат в едином корпусе также датчики, схемы драйверов, защиты, диагностики, источников питания и т.п. Стандартные IGBT-модули можно условно разбить на два типа: паяной конструкции с изолированным основанием и прижимной (Press-Pack).

СОСТОЯНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ РАЗРАБОТОК И ПРОИЗВОДСТВ

Рынок силовых модулей в России на 95% заполнен продукцией импортного производства. Однако при этом существуют российские аналоги зарубежных силовых модулей. Они, как правило, дешевле и применяются там, где запрещено использование импортной продукции (например, электроника для ВПК). К сожалению, российские производители силовых модулей пока не приобрели широкой известности. Тем не менее, они успешно работают на рынке, постепенно завоевывая популярность у российских разработчиков. Примером может служить компания ОАО "Контур" (Чебоксары), работающая на рынке с 1998 года. Она выпускает широкий спектр современной элементной базы для производителей преобразовательной, приводной и бытовой техники, а также для ВПК. Предприятие наладило серийный выпуск более 50 наименований IGBT-модулей (на напряжения 600–1700 В и токи до 400 А) и MOSFET-модулей (на напряжения 100–800 В и токи 30–500 А). В 2006 году на предприятии в строй было введено полностью автоматизированное технологическое оборудование, которое позволяет исключить человеческий фактор из процесса производства и обеспечить 100%-ный выходной

параметрический контроль изделий. Модули производятся на базе импортных кристаллов, что позволяет получить качество импортных модулей по цене российских. Компания гарантирует техническое обслуживание поставляемых модулей после продажи. Самая широкая и популярная серия модулей ОАО "Контур" – IGBT-модули.

Сегодня эти устройства занимают самый большой сегмент рынка силовых транзисторов. Основу IGBT-модулей составляют IGBT-транзисторы. От других транзисторов их отличает малая величина остаточного напряжения (не более 2,5 В), устойчивость к большим импульсным токам, малые емкости и заряды затворов, большие допустимые энергии переключения, расширенный диапазон области безопасной работы, высокие частоты переключения (до 25 кГц). Поэтому модули на их основе демонстрируют высокую надежность, высокое быстродействие и удобство в эксплуатации. Структуру приборов составляют одиночный ключ, чоппер, полумост, инвертор. Все приборы имеют встроенный инверсный быстро восстанавливающийся MPS-диод с "мягкими" характеристиками обратного восстановления. Корпус модуля включает изолированное медное основание, изоляция осуществляется керамикой Al_2O_3 . Модули имеют номинальное напряжение в диапазоне 600–1700 В, падение напряжения не более 1,7–2,0 В и токи до 400 А. Однако широкому их распространению мешает высокая стоимость.

Технические характеристики модулей представлены в табл.1. В последнем столбце приведен аналог – модуль, выпускаемый ОАО "Электровыпрямитель" (Саранск).

Таблица 1. Технические параметры силовых IGBT-модулей ОАО "Контур"

Обозначение	Основные характеристики						Аналог ОАО "Электровыпрямитель"
	Транзистор			Диод			
	R_{thjc} , °C/Вт	$U_{ce(on)}$, В	$t_{d(off)}$, нс	R_{thjcd} , °C/Вт	U_f , В	t_{rr} , нс	
1200 В ключ							
МТКИ-200-12	0,08	2,2	800	0,16	2,0	400	МТКИ-200-12
МТКИ-300-12	0,05	2,2	800	0,12	2,0	400	МТКИ-300-12
МТКИ-400-12	0,045	2,2	800	0,09	2,0	400	МТКИ-400-12
1200 В полумост							
М2ТКИ-50-12	0,3	2,1	800	0,6	2,3	400	М2ТКИ-50-12
М2ТКИ-75-12	0,235	2,1	500	0,55	2,3	400	М2ТКИ-75-12
М2ТКИ-100-12	0,18	2,1	500	0,36	2,3	400	М2ТКИ-100-12
М2ТКИ-150-12	0,12	2,1	500	0,24	2,0	400	М2ТКИ-150-12
М2ТКИ-200-12	0,09	2,1	700	0,18	2,0	400	М2ТКИ-200-12
1200 В верхний чоппер							
МТКИД-50-12	0,3	2,1	700	0,6	2,3	400	МТКИД-50-12
МТКИД-75-12	0,235	2,1	500	0,55	2,3	400	МТКИД-75-12
МТКИД-100-12	0,18	2,1	500	0,36	2,3	400	МТКИД-100-12
МТКИД-150-12	0,12	2,1	500	0,24	2,0	400	МТКИД-150-12
МТКИД-200-12	0,09	2,1	500	0,18	2,0	400	МТКИД-200-12
1200 В нижний чоппер							
МДТКИ-50-12	0,3	2,1	500	0,6	2,3	400	МДТКИ-50-12
МДТКИ-75-12	0,235	2,1	500	0,55	2,3	400	МДТКИ-75-12
МДТКИ-100-12	0,18	2,1	500	0,36	2,3	400	МДТКИ-100-12
МДТКИ-150-12	0,12	2,1	500	0,24	2,0	400	МДТКИ-150-12
МДТКИ-200-12	0,09	2,1	500	0,18	2,0	400	МДТКИ-200-12

Примечание. R_{thjc} – тепловое сопротивление между переходом и корпусом; U_{ce} – напряжение "коллектор-эмиттер"; T_d – время задержки выключения; R_{thjcd} – тепловое сопротивление между кристаллом и основанием; U_f – прямое падение напряжения; t_{rr} – время обратного восстановления.

Для управления силовыми модулями рекомендуется применять драйверы на основе гибридных интегральных схем серии МД производства ОАО "Контур" – МД215П, МД250П, МД280П. Каждая такая ИС содержит два канала управления транзисторами с предельно допустимым напряжением до 1700 В и обеспечивает защиту от перегрузок, короткого замыкания в нагрузке, недостаточного уровня напряжения на затворе транзистора.

ОАО "Электровыпрямитель" – один из крупнейших российских производителей полупроводниковых приборов силовой электроники и преобразовательной техники – имеет почти пятидесятилетний опыт работы в этой области.

На предприятии освоен выпуск серии IGBT-модулей на токи 25–2400 А и напряжение до 3300 В (табл. 2). Производится свыше 60 типов силовых IGBT-модулей в семи базовых конструкциях, соответствующих международным стандартам. Схемные исполнения модулей – одиночные ключи, чопперы и полумосты. В модулях предусмотрены защитные диоды обратного тока с "мягкими" характеристиками восстановления.

Предприятие производит также IGBT-модули для транспорта. Конструкция этих модулей адаптирована для работы приборов в многократно повторяющихся режимах "включено-выключено": увеличены изоляционные промежутки, усилена конструкция корпуса для применения в условиях повышенных механических нагрузок. По заказам МПС, с учетом особенностей российских железных дорог, разрабатываются модули специального исполнения для эксплуатации при низких температурах (до -60°С) и с напряжением изоляции до 13 кВ.

Выпускаются силовые модули для энергосберегающих

приводов: преобразователи частоты и устройства плавного пуска для низковольтных асинхронных электроприводов мощностью от 1,5 до 400 кВт, напряжением 0,4 кВ и высоковольтных асинхронных и синхронных электроприводов мощностью от 500 до 20000 кВт, напряжением 6; 10; 15; 75 кВ.

Разработаны серии таблеточных IGBT-модулей на токи до 1400 А и напряжение до 5200 В, предназначенных для энергетики, городского, пригородного и железнодорожного электротранспорта, большегрузных карьерных самосвалов и т.п.

Разработана также серия запираемых тиристоров на токи 630–2000 А и напряжение до 5000 В. Осваивается и производство четвертого поколения запираемых тиристоров GCT и IGCT на токи до 4000 А и напряжение до 6000 В.

Расширяется номенклатура и совершенствуются стандартные полупроводниковые приборы силовой электроники – диоды, тиристоры, динисторы, триаки. Освоен выпуск серии выпрямительных диодов (в том числе лавинных и быстровосстанавливающихся), тиристоров (низкочастотных и быстродействующих), триаков малой и средней мощности на токи 10–80 А и напряжение до 1600 В в герметичных металлостеклянных корпусах. В этих же корпусах поставляются оптронные тиристоры на токи 25–80 А и напряжение до 1200 В.

Ряд диодно-тиристорных модулей насчитывает около 80 типов, выполненных по схемам одиночных ключей и полумостов. Подготовлено производство серии диодно-тиристорных модулей по схемам одно- и трехфазных мостов. Диапазон токов таких модулей 40–250 А, напряжение – до 1600 В.

Продолжается совершенствование диодов и тиристоров таблеточной конструкции. Так, выпущена серия быстродейс-

Таблица 2. IGBT-модули производства ОАО "Электровыпрямитель"

IGBT-модуль	Электрические характеристики	Габариты и масса
Одиночные ключи (МТКИ)	$I_c = 15, 25, 30, 50 \text{ A};$ $V_{ces} = 600, 1200 \text{ B}$	25 × 30 мм, 25 г
Полумосты (М2ТКИ, М2ТКИ2, М2ТКИ3)	$I_c = 25, 50, 75, 100, 150, 200 \text{ A};$ $V_{ces} = 600, 1200 \text{ B}$	34 × 94 мм, 180 г
Чопперы (МДТКИ, МТКИД, МТКИД2, МДТКИ2)	$I_c = 25, 50, 75 \text{ A};$ $V_{ces} = 1200, 1700 \text{ B}$	
Полумосты (М2ТКИ, М2ТКИ2)	$I_c = 100, 150, 200, 300, 400 \text{ A};$ $V_{ces} = 600, 1200, 1700 \text{ B}$	62 × 107 мм, 420 г
Чопперы (МДТКИ2, МДТКИ, МТКИД2, МТКИД)	$I_c = 100, 150, 200 \text{ A};$ $V_{ces} = 1200, 1700 \text{ B}$	
Одиночные ключи (МТКИ2, МТКИ)	$I_c = 200, 300, 400 \text{ A};$ $V_{ces} = 1200, 1700 \text{ B}$	
Полумосты (М2ТКИ)	$I_c = 400, 600, 800 \text{ A};$ $V_{ces} = 1200, 1700 \text{ B}$	140 × 130 мм, 1600 г
Чопперы (МДТКИ)	$I_c = 400, 600, 800 \text{ A};$ $V_{ces} = 1200, 1700 \text{ B}$	
Одиночные ключи (МТКИ)	$I_c = 800, 1000, 1200, 1600 \text{ A};$ $V_{ces} = 1200, 1700, 2500, 3300 \text{ B}$	
Чопперы (МДТКИ)	$I_c = 800, 1000, 1200, 1600 \text{ A};$ $V_{ces} = 1200, 1700, 2500, 3300 \text{ B}$	140 × 190 мм, 2600 г
Одиночные ключи (МТКИ)	$I_c = 1200, 1500, 1800, 2400 \text{ A};$ $V_{ces} = 1200, 1700, 2500, 3300 \text{ B}$	



твующих частотно-импульсных тиристоров (ТБИ) на токи 100–1600 А и напряжение до 2000 В, время выключения 50–10 мкс. Благодаря специальной топологии катодного эмиттера тиристоры имеют малое время полного включения и низкие потери энергии при работе с большими скоростями нарастания тока нагрузки. В сочетании с малыми значениями времени задержки включения, нарастания тока и времени выключения это позволяет эффективно применять тиристоры на частотах до 10 кГц, а в некоторых случаях – до 20 кГц и выше (в многофазных последовательных резонансных инверторах напряжения на частотах до 50 кГц). Области применения этих тиристоров – мощные электроприводы для промышленности и транспорта, установки индукционного нагрева, электросварки, источники бесперебойного питания и др. Тиристоры серии ТБИ выпускаются также и в модульном исполнении.

Модули диодные и тиристорные разработки ОАО "Электровыпрямитель" (быстродействующие, быстродействующие частотно-импульсные, низкочастотные) применяются для управления электродвигателями постоянного тока; мягкого пуска электродвигателей переменного тока; контроля температуры (например, для печей, химических процессов); источников бесперебойного питания; электросварки.

На выставке "ЭкспоЭлектроника–2004" впервые широкой аудитории была представлена неизвестная фирма "Электрум АВ" (Орел), что вызвало огромный интерес посетителей. И это неудивительно. Специалисты фирмы создали в нашей стране направление современных оптоэлектронных коммутаторов большой мощности (так называемые твердотельные реле) и к настоящему времени разработали и освоили более 500 типов новых приборов силовой электроники, причем многие из них уникальны по своим техническим характеристикам даже по сравнению с лучшими зарубежными приборами. ООО "Электрум АВ" выпускает всю гамму силовых модулей на основе тиристоров, диодов, IGBT и полевых транзисторов. Для примера можно выделить следующие интегральные силовые модули и драйверы.

Интеллектуальный 7-ключевой IGBT-модуль (инвертор с тормозным транзистором), выполненный на основе современных 1200 В–75 А кристаллов с предельно малыми потерями и широкой областью безопасной работы. Модуль имеет встроенные драйверы для управления и защиты транзисторов, датчик напряжения в плюсовой шине с гальванической развязкой, который передает в контроллер сигнал уровня 0–5 В, пропорциональный напряжению в силовой шине, датчик тока в минусовой шине, а также датчик температуры модуля. На основе такого модуля можно создать законченный преобразователь частоты до 10 кВт.

Серия одно- и трехфазных выпрямительных модулей на токи до 250 А, (неуправляемых, частично-управляемых и полностью управляемых, в том числе и с оптронными развяз-

ками по входам управления), выполненных на тиристорных и диодных структурах с предельно допустимым напряжением до 1200 В.

Твердотельные реле переменного тока до 250 А (однофазные) и до 120 А (трехфазные).

Твердотельные контроллеры цепей питания и нагрузок обеспечивают защиту нагрузки от аварийных ситуаций и формируют сигналы текущего состояния нагрузки.

Серия драйверов для управления одиночными и полумостовыми высоковольтными IGBT/MOSFET-модулями высокой мощности (до 4500 В и 2000 А) со встроенными DC/DC-преобразователями и защитой.

Драйвер для управления мощными тиристорами с гальванической развязкой цепи управления (напряжение изоляции до 10 кВ) и формированием короткого форсажного импульса (10 А/мкс), необходимого для надежного включения тиристора с током до 6000 А.

Серия модульных малогабаритных приводов асинхронных, вентильных, коллекторных, шаговых двигателей мощностью до 10 кВт, при этом модуль управления двигателем до 1 кВт имеет габариты около 1/2 размера сигаретной пачки.

Все перечисленные силовые модули по своим техническим параметрам, качеству и надежности соответствуют лучшим зарубежным образцам. Эти показатели позволяют использо-

вать предложенные изделия в жестких условиях, что вызывает большой интерес к ним у МО РФ и предприятиях ВПК.

На предприятии внедрена единая система обеспечения качества для промышленных приборов и приборов военного назначения. Качество контролируется на каждой технологической операции. Таким образом, специалисты "Электрум АВ" могут предоставить отечественным производителям и разработчикам силовой электроники полупроводниковые элементы высочайшего качества по низким ценам, с параметрами, которые соответствуют или превосходят лучшие зарубежные образцы.

ОАО "ОКБ "Искра" (Ульяновск) выпускает широкий ассортимент устройств силовой электроники: мощные высоковольтные переключательные транзисторы, мощные биполярные транзисторы, высоковольтные МОП-транзисторы, мощные переключающие МОП-транзисторы, мощные IGBT-модули, которые предназначены для преобразователей частоты в системах энергоснабжения, импульсных модуляторах, во вторичных источниках питания.

Недавно в ОАО "ОКБ "Искра" совместно с ОАО "Ангстрем" (Зеленоград) разработан мощный высоковольтный ДМОП-транзистор с поликремниевым затвором (серия 2П(КП)715). Транзистор характеризуется максимальным напряжением "сток-исток" 600–1200 В, током стока 50–75 А, сопротивлением в открытом состоянии 0,08–0,3 Ом и низкими потерями при переключении. Конструкция и технология изготовления кристалла транзистора обеспечивают низкие значения входной, выходной и проходной емкостей, малый заряд затвора, короткий канал, стабильность порогового напряжения транзистора и высокую удельную проводимость на единицу площади.

Высокий уровень технологии позволил минимизировать заряд в окисле и на границе раздела окисел-полупроводник, а также предотвратить дрейф подвижных зарядов в силь-

ном статическом поле при высоком напряжении "сток-исток", что обеспечивает высокую надежность прибора. Кристаллы транзистора монтируются в специально спроектированный металлокерамический корпус с безындуктивными выводами. Такой монтаж позволяет улучшить динамические параметры прибора при его работе в ВЧ-преобразователях. Корпус имеет высокую теплопроводность благодаря применению в качестве изолятора оксида бериллия (BeO), характеризуется высокой энергоциклостойкостью вследствие отсутствия "мягких" припоев, а также имеет широкий диапазон рабочих температур (от -60 до 150°C). Прибор универсален с точки зрения частотных свойств и применим как в широкополосных СВЧ-схемах, так и в ВЧ-преобразователях, в частности в резонансных режимах на частотах 200 кГц и выше.

Результаты испытаний транзисторов 2П(КП)7154 показывают, что их работоспособность будет высокой даже в экстремальных условиях (при высоких перепадах температуры, в космосе, в условиях высокого электромагнитного воздействия). В настоящее время начат серийный выпуск данных приборов для спецтехники. Основные режимы эксплуатации транзисторов приведены в табл. 3.

В табл. 4 приведены российские фирмы-производители приборов и модулей силовой электроники и перечислена продукция, которую они выпускают.

ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ ДИСКРЕТНЫХ ПРИБОРОВ И МОДУЛЕЙ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Параметры кремниевых приборов силовой электроники (коммутируемое напряжение, токи и частота коммутации) за последние 50 лет почти достигли теоретических пределов. Дальнейшее их улучшение связано с совершенствованием и внедрением новых технологий с целью увеличения быстродействия, уменьшения прямого падения напряжения, улучшения стойкости к перегрузкам и аварийным режимам, повышения

Таблица 3. Предельно допустимые значения параметров электрических режимов эксплуатации транзисторов

Параметр, (режим измерения), единица измерения	Обозначение	Норма			Примечание
		2П(КП)7154АС	2П(КП)7154БС	2П(КП)7154ВС	
Максимально допустимое напряжение сток-исток, В, не менее	$U_{СИ\max}$	1200	800	600	При $T_{окр. ср.} = 25^{\circ}C$
Максимально допустимое напряжение затвор-исток, В, не менее	$U_{ЗИ\max}$	± 25	± 25	± 25	При $T_{окр. ср.} = 60-125^{\circ}C$
Максимально допустимый импульсный ток стока ($\tau_{и} \leq 300$ мкс, $Q \geq 100$), А, не менее	$I_{С(и)\max}$	100	120	150	При $T_{корп} = 25^{\circ}C$
Максимально допустимый постоянный ток стока, А, не менее	$I_{С\max}$	50	60	75	При $T_{корп.} = 25^{\circ}C$
Максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность стока при температуре корпуса от -60 до 25 °С, Вт	P_{\max}	875	875	875	При $T_{корп.} = 25-125^{\circ}C$
Максимально допустимая температура перехода, °С	$T_{П\max}$	150	150	150	

Примечание. Рассеиваемая мощность рассчитывается по формуле: $P_{\max} = (T_{П\max} - T_{корп})P_{\max} / (R_{тп-к})$ [Вт], где $T_{П\max}$ – максимальная температура перехода; $T_{корп}$ – температура корпуса; $R_{тп-к}$ – тепловое сопротивление "переход-корпус", равное 0,143°C/Вт.

**Таблица 4. Отечественные производители приборов и модулей силовой электроники**

Производитель	Продукция
ЗАО "НТЦ СИТ", г. Орел e-mail: gromov@sitsemi.ru	Сборки диодов Шоттки на рабочие токи до 50 А и обратные напряжения до 800 В Транзисторы IGBT (БТИЗ – биполярные транзисторы с изолированным затвором) и быстровосстанавливающиеся диоды на рабочие токи до 100 А и напряжения 1200, 1800 и 2500 В Силовые IGBT-модули и диоды быстровосстанавливающиеся $U_{кзmax}=1200$ В, $I_{кmax}=200; 300; 400$ А Модули тиристорные, диодные, диодно-тиристорные на токи до 200 А, в том числе спецназначения Микросхемы для управления сетевым напряжением, импульсными источниками питания, микросхемы линейных стабилизаторов напряжения (ЛСН), схемы управления двигателями, реле, герконами
ЗАО "Протон-Импульс", г. Орел e-mail: energia@proton-impuls.ru	Силовые модули MOSFET, IGBT, IPM, тиристорно-диодные на напряжение от 600 до 1200 В и токи от 10 до 160 А Твердотельные реле переменного и постоянного тока на напряжение от 600 до 1200 В и токи от 10 до 100 А
ЗАО "Протон-Электротекс", г. Орел e-mail: eltex@orel.ru	Силовые тиристоры (низкочастотные, быстродействующие, лавинные), диоды (выпрямительные, лавинные, быстровосстанавливающиеся лавинные) Силовые модульные сборки Ограничители напряжения для защиты диодов и тиристоров Конвертеры DC/DC, AC/DC, DC/AC Охлаждители воздушных систем охлаждения
ОАО "Электровыпрямитель", г. Саранск e-mail: martin@moris.ru	Силовые модули MOSFET, IGBT, тиристорно-диодные, тиристорные на напряжение до 4000 В и токи от 10 до 600 А Силовые транзисторы IGBT Драйверы, конвертеры DC/DC, AC/DC, DC/AC
ОАО "Фрязинский завод мощных транзисторов", г. Фрязино e-mail: sbit@fzmt.ru	Биполярные мощные транзисторы (БМТ), а также полевые и биполярные мощные транзисторы с изолированным затвором (МОП МТ и БТИЗ), триаки и тиристоры на напряжение от 20 до 2000 В и токи от 1 до 100 А Мощные транзисторы специального назначения применяются в ответственных узлах и блоках электропитания и электрооборудования различных систем вооружений и военной техники (ВВТ)
ОАО "Воронежский завод полупроводниковых приборов-С", г. Воронеж e-mail:	Специальная силовая электроника, мощные n-канальные полевые транзисторы, мощные диоды Шоттки, мощные высоковольтные ультрабыстрые диоды и модули на их основе, стабилизаторы напряжения, мощные СВЧ-транзисторы
ОАО "ОКБ-Планета", г. Великий Новгород e-mail: danilovin@okbplaneta.ru	Импульсные тиристоры малой и средней мощности на напряжение от 200 до 1000 В и токи от 7 до 75 А Малощумящие кремниевые транзисторы на частоты до 7 ГГц Малощумящие арсенидгаллиевые транзисторы на частоты до 37 ГГц Мощные диоды, варикапы, тиристоры, стабилитроны, симисторы на напряжение от 50 до 1000 В
ОАО "Контур", г. Чебоксары e-mail: sales@oaokontur.com	Разрабатывает, производит и поставляет более 50 типов силовых IGBT-и MOSFET-модулей на токи 25–400 А и напряжение 60–1700 В и диодно-тиристорных модулей напряжением до 1600 В. В номенклатуру выпускаемой продукции входят одно- и двухключевые IGBT-модули на токи от 50 до 400 А, напряжение до 1700 В в двух типах корпусов
ОАО "ОКБ "Искра", г. Ульяновск e-mail: iskragai@mv.ru	Мощные высоковольтные переключающие транзисторы на напряжение от 600 до 1000 В, ток 25А Мощные биполярные транзисторы на напряжение от 600 до 1500 В, токи от 16 до 40 А Высоковольтные полевые МОП-транзисторы на напряжение до 1200 В, токи до 75 А IGBT-транзисторы на напряжение до 1700 В, токи до 100 А IGBT-модули на напряжение до 1500 В, токи до 150 А
ООО "Краснознаменский завод полупроводниковых приборов "Арсенал", Моск. обл., г. Краснознаменск	Биполярные транзисторы, диоды и диодные сборки Варикапы, стабилитроны, наборы, мосты Микросхемы преобразователей и стабилизаторов
ФГУП "ГЗ "Пульсар", г. Москва e-mail: pulsar@rosprom.org	Мощные МДП-полевые транзисторы и модули на напряжение до 200 В и токи от 50 до 200 А Интеллектуальные модули-автоматы коммутации и защиты на токи до 20 А Высоковольтные биполярные транзисторы на токи до 15 А и напряжение от 800 до 1500 В Высоковольтные биполярные транзисторы с изолированным затвором на токи до 100 А и напряжение до 300 В СВЧ кремниевые эпитаксиально-планарные полевые с изолированным затвором и p-каналом транзисторы на частоты от 400 до 2000 МГц Силовые диоды и выпрямители, IGBT-модули
НПП "Томилинский электронный завод", г. Томилино Моск. обл. e-mail: npptez@mail.ru	Стабилизаторы напряжения, микросхемы управления источниками питания, диодные матрицы, кремниевые выпрямительные мощные диоды и сборки Диоды Шоттки на SiC
ОАО "Восход-КРЛЗ", г. Калуга e-mail: krlz@kalyga.ru	Стабилитроны Наборы сборки, мосты
ООО "Электрум АВ", г. Орел	Оптоэлектронные твердотельные реле постоянного и переменного тока Силовые ключи, драйверы
ООО "АстраЭлектро", г. Москва e-mail: info@astrael.ru, astrael@astrael.ru	Диоды лавинные на напряжение от 400 до 5000 В Диоды быстровосстанавливающиеся на напряжение от 600 до 3600 В Тиристоры низкочастотные, симметричные, быстродействующие, оптронные, запираемые на напряжение от 400 до 2000 В Модули силовые низкочастотные на напряжение от 400 до 2500 В, оптоотиристорные на напряжение от 400 до 1600 В, тиристорно-диодные на напряжение от 600 до 1600 В

диапазона коммутируемых токов и напряжений, снижения стоимости, повышения надежности, прочности, улучшения охлаждения за счет применения новых технологий корпусирования (press-pack technology, MMC, жидкостное охлаждение).

В последние годы ведутся широкие исследования новых материалов для приборов силовой электроники – арсенида галлия, карбида кремния, III-нитридов. Очень перспективен карбид кремния. Пробивная напряженность электрического поля SiC более чем на порядок превышает соответствующие показатели у Si и GaAs. Это приводит к значительному снижению сопротивления в открытом состоянии (R_{on}). Малое удельное сопротивление в открытом состоянии в сочетании с высокой плотностью тока и теплопроводностью позволяет использовать очень маленькие по размерам кристаллы для силовых приборов.

Большая ширина запрещенной энергетической зоны SiC является результатом более высокого по сравнению с Si и GaAs барьера Шоттки. В результате чрезвычайно малый ток утечки при повышенной температуре кристалла (менее 70 мкА при 200°C) снижает термоэлектронную эмиссию за пределами барьера.

Высокая теплопроводность SiC уменьшает тепловое сопротивление кристалла по сравнению с Si-диодами почти в два раза. Электронные свойства приборов на основе SiC высокостабильны во времени и слабо зависят от температуры, что обеспечивает высокую надежность изделий.

Карбид кремния устойчив к жесткой радиации, поэтому ее воздействие не приводит к деградации электронных свойств кристалла. Высокая рабочая температура кристалла (более 600°C) позволяет создавать высоконадежные приборы для жестких условий эксплуатации и специальных применений.

В ближайшие годы можно ожидать разработку и освоение приборов силовой электроники на базе SiC следующих типов:

- быстродействующих диодов (Шоттки) с блокирующим напряжением 4,9 кВ;
- MOSFET с коммутируемыми напряжениями более 1000 В и сопротивлением в открытом состоянии, на три порядка меньшим по сравнению с MOSFET на базе Si;
- JFET (полевой транзистор, управляемый рп-переходом) с блокирующими напряжениями 3,5 кВ, с удельным сопротивлением в открытом состоянии 25 мОм·см² (как у модуля CoolMOS на 600 В), что соответствует плотностям коммутируемых токов 100 А/см² и прямым падениям напряжения около 2,5 В (для приборов на 3300 В);
- каскодных SiC – Si приборов;
- высоковольтных быстродействующих биполярных силовых приборов (диодов, транзисторов, тиристоров) с коммутируемыми напряжениями более 10 кВ (19 кВ) и частотами коммутации несколько килогерц.

Несмотря на то, что отечественная электронная промышленность традиционно ориентирована на рынок компонентов

для промышленного и военного применения (а приборы на SiC представляют для этих применений большой интерес), серийных отечественных технологий в области SiC-полупроводников в ближайшие годы не появится из-за недостаточного финансирования. Но исследования и разработки приборов на новых материалах, тем не менее, проводятся. Например, в НПП "Томилинский электронный завод" (НПП "ТЭЗ") начато производство диодов Шоттки и высоковольтных выпрямительных столбов на карбиде кремния. В качестве исходного материала использовались пластины и структуры фирмы "Cree". Проведенные испытания по программе "Климат-7" подтвердили чрезвычайную радиационную стойкость приборов: поглощенная доза 50 000 крад не привела к изменению характеристик приборов. Параметры диодов на SiC, разработанных в НПП "ТЭЗ": постоянное обратное напряжение 300–500 В, время восстановления обратного сопротивления 35 нс.

Последние достижения в полупроводниковой (MOSFET, IGBT, мощные высоковольтные диоды Шоттки) и микроэлектронной (чипы высокой степени интеграции, SMD-компоненты и т.д.) технологиях, успехи в компьютерной технологии (микроконтроллеры, цифровые сигнальные процессоры или микроконтроллеры, флэш-память большого объема), а также в области полимеров, планарных моточных изделий, "микрочечатных" плат дает мощный импульс развитию интеллектуальных силовых модулей. Можно выделить два направления.

Первое связано с интеграцией в одном корпусе нескольких MOSFET (или чаще IGBT) для образования более сложных силовых структур. В дальнейшем предполагается объединить в одном модуле силовые компоненты различного вида. Уже сегодня в некоторых работах предложено комплексирование MOSFET и IGBT в одном корпусе по схеме параллельного соединения.

Второе направление совершенствования интегральных силовых модулей – встраивание (интеграция) в силовые ключи или их конфигурацию (полумосты, мосты) управляющих драйверов или/и ШИМ-контроллеров и т. п. Следует ожидать, что в силовую часть модулей большой и очень большой мощности будет дополнительно встроено ряд датчиков для диагностики работоспособности. Возможны и другие варианты совершенствования собственно силовой части IPS и IPM.

Можно сказать, что переход в интеллектуальных силовых модулях от аналогового на цифровое управление приведет к широкому использованию драйверов и контроллеров. Широкое применение при встраивании получают микроконтроллеры с развитой инфраструктурой (обрамлением) и большим объемом памяти. Это позволит реализовать функции, которые сейчас выполняются в простейшем виде или вообще отсутствуют.

Расширится также и сфера применения интеллектуальных силовых компонентов. Они станут привычными электронными компонентами для разработчика, такими как дискретные



MOSFET, IGBT, драйверы, ШИМ, ЧИМ и ККМ/PFC-контроллеры. Не исключено, что для организации автоматизированных систем (как показано на примере Smart motor) потребуются только персональный компьютер (компьютерный комплекс), каналы связи (в том числе беспроводные), источник(и) электропитания (при необходимости) и программное обеспечение. Возможно, что в IPM (SuperIPM) будут встроены модули Ethernet (как в промышленных компьютерах). В качестве примеров можно назвать следующие перспективные сферы применения интеллектуальных силовых компонентов: источники вторичного электропитания – низковольтные и высоковольтные; электроприводы различного назначения со встраиванием IPM (SIPM) и силовых драйверов непосредственно в корпуса электродвигателей; интеллектуальные исполнительные механизмы и устройства (электромагнитные, пневмо-и гидроклапаны, заслонки, вибропитатели и пр.) со встроенными интеллектуальными силовыми компонентами; автомобильная электроника; бытовые электроприборы и установки; робототехнические системы и устройства.

В заключение можно сказать, что именно интеллектуальная силовая электроника – настоящее и перспективное направление hi-tech, о котором много говорят и пишут в специализированных изданиях и у которого большое будущее.

ЛИТЕРАТУРА

- Флоренцев С.Н.** Современное состояние и перспективы развития приборов силовой электроники. – Электронная промышленность, 2002, № 4, с. 34.
- Флоренцев С.Н.** Силовые IGBT-модули – основа современного преобразовательного оборудования. – Электронные компоненты, 2002, № 6, с. 11.
- Чибирик В.** ОАО "Электровыпрямитель" – поставщик элементной базы силовой электроники. – Электронные компоненты, 2002, № 6, с. 71.
- Ланцов В., Эраносян С.** Интеллектуальная силовая электроника. – Силовая электроника, 2006, № 1, с. 4.
- Пастухов В.** Современные российские силовые модули. – Современная электроника, 2006, № 8, с. 22.
- Бандура Г., Пастухов В.** Российские IGBT-модули производства ОАО "Контур". – Силовая электроника, 2007, № 1, с. 28.
- Полищук А.** Полупроводниковые материалы и приборы для жестких условий эксплуатации. Современная электроника, 2006, № 4, с. 20.
- Волошин С.** Новое имя в силовой электронике России. – Электронные компоненты, 2004, № 6, с. 59.
- Адонин А.С., Добровицкий А.И.** Карбидкремниевые диоды Шоттки и высоковольтные выпрямительные столбы для силовой и высокочастотной электроники. – Электроника и электрооборудование транспорта, 2006, № 3-4, с. 40.
10. **Алферов А** и др. Новые высоковольтные транзисторы. – Силовая электроника, 2007, № 1, с. 8.