

# SEMITOR:

## 40 кВА в 40 кубических сантиметрах

На выставке PCIM, прошедшей в Нюрнберге в мае 2006 года, компанией SEMIKRON были представлены новые компоненты семейства SEMITOR. С их появлением максимальная моторная мощность в инверторном включении для данного класса модулей увеличена более чем в 3 раза. Это стало возможным благодаря тщательной компьютерной проработке тепловых и механических характеристик конструктива SEMITOR 4.

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

В гамме продукции компании SEMIKRON модули серии SEMITOR являются самыми маломощными. Они рассматриваются как альтернатива дискретным транзисторам в корпусах TO — наиболее популярным компонентам для разработки и производства преобразователей мощностью до 5 кВт. Модули SEMITOR (рис. 1) выпускаются по фирменной прижимной технологии SKiIP, позволяющей обеспечить хорошие тепловые характеристики и высокие показатели надежности [1, 2].

Основными требованиями современного рынка силовой электроники являются увеличение плотности мощности, снижение габаритов, уменьшение потерь мощности, расширение температурного диапазона и повышение надежности работы в пиковых режимах. Стремясь выполнить эти требования, производители компонентов вынуждены снижать запас по предельным характеристикам — в первую очередь это касается тепловых режимов работы. Проектирование силовых ключей, предназначенных для работы в экстремальных температурных режимах, требует от разработчиков крайне серьезного исследования происходящих в них тепловых и механических процессов.

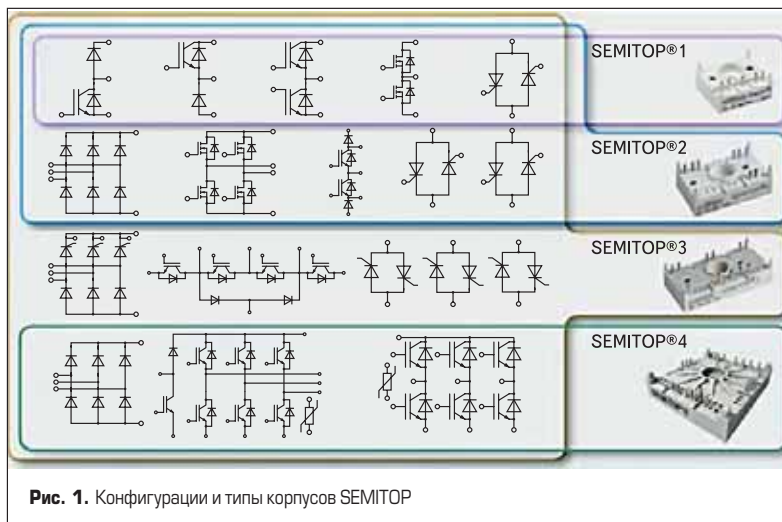


Рис. 1. Конфигурации и типы корпусов SEMITOR



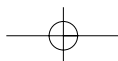
Рис. 2. Внешний вид модуля SEMITOR 4

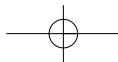
Все указанные соображения были учтены при проектировании элементов нового типоразмера SEMITOR 4, внешний вид которых показан на рис. 2. Для обеспечения высокой надежности, а также оптимизации механических и тепловых параметров, разработка конструкции SEMITOR 4 производилась с использованием специализированного программного обеспечения методом конечных элементов. Результаты компьютерного анализа были подтверждены в ходе 17 различных типов испытаний и квалификационных тестов, продолжавшихся более 10 тыс. часов.

Напомним основные особенности модулей серии SEMITOR:

- низкое тепловое сопротивление и высокая устойчивость к термоциклированию благодаря использованию прижимной технологии SKiIP и отсутствию базовой платы (baseless pressure contact technology);
- новейшие технологии кристаллов;
- простая и удобная конструкция, одинаковый способ крепления для всех типов модулей серии.

Для установки модулей SEMITOR на радиатор служит один крепежный винт. Равномерное распределение прижимного усилия и хороший отвод тепла обеспечиваются конструкцией корпуса модуля. Оптимальное взаимное расположение силовых кристаллов транзисторов и диодов позволяет получить минимальное значение распределенной индуктивности силовых шин.





**Таблица 1.** Варианты исполнения компонентов SEMITOP 4

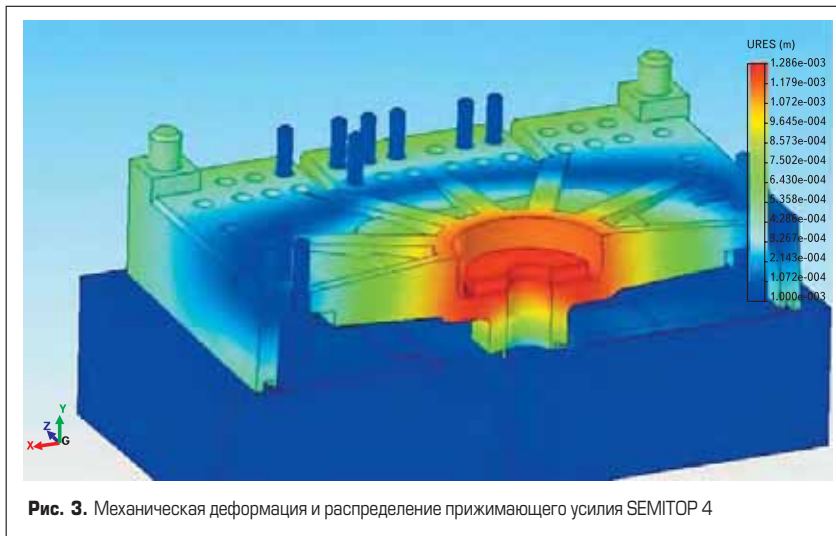
Конфигурация	Ток $I_C$ , А (при $T_s = 25^\circ\text{C}$ )	Ток $I_C$ , А (при $T_s = 80^\circ\text{C}$ )
GD126: 3-фазный инвертор IGBT, $V_{CE} = 1200\text{ В}$	100	70
	77	53
	65	43
GD066: 3-фазный инвертор IGBT, $V_{CE} = 600\text{ В}$	155	110
	117	82
	84	55
DGD126: CIB, $V_{CE} = 1200\text{ В}$	60	40
	45	30
DGD066: CIB, $V_{CE} = 1200\text{ В}$	90	70
	75	56
MD: 3-фазный инвертор MOSFET, $V_{DS} = 100\text{ В}$ ; MOSFET, $V_{DS} = 55\text{ В}$	165	125
	225	170

Примечания:

- $I_C$  — ток коллектора IGBT (стока MOSFET);
- $V_{CE}$  — напряжение «коллектор–эмиттер» IGBT;
- $V_{DS}$  — напряжение «сток–исток» MOSFET;
- предельная температура кристаллов  $T_{jmax}$  в версии DGDLO66 —  $175^\circ\text{C}$ .

Модули SEMITOP 4, размеры которых составляют  $60 \times 55 \times 12\text{ мм}$ , совместимы с элементами типоразмеров 1...3 по высоте, способу крепления и подключения. Это означает, что несколько различных модулей можно устанавливать на общем теплоотводе, используя для подключения одну печатную плату. Компоненты серии, изготовленные на основе кристаллов IGBT и MOSFET, доступны в двух приводных конфигурациях: 3-фазный инвертор и CIB (выпрямитель, инвертор и тормозной чопер). Состав серии и предельные токи модулей при двух температурах радиатора —  $25$  и  $80^\circ\text{C}$ , приведены в таблице 1.

Как показывают данные, приведенные в таблице, плотность мощности IGBT инвертора, построенного на основе SEMITOP 4, повышена на 47% по сравнению с типоразмером 3 для IGBT с напряжением 600 В и на 38% по сравнению с ключами 12 класса. Чтобы достичь таких результатов, в модулях были использованы керамические подложки с улучшенными тепловыми характеристиками и оптимизированным соотношением толщины керамики и медного диффузионного покрытия. В качестве материала керамики применен оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  толщиной 0,38 мм, изготовленный по новой технологии Suramik pre-bent technology [3]. Этот технологический процесс обеспечивает пластине «предварительный изгиб», необходимый для компенсации механического напряжения, возникающего при пайке кристаллов. Он был разработан специально для модулей прижимной конструкции, не имеющих базовой платы. Для таких компонентов чрезвычайно важно обеспечение плоскостности основания: только так можно получить хорошее распределение теплопроводящей пасты при установке модуля на радиатор и практически 100%-ную ее адгезию в зазоре. В связи с особенностями конструктива SEMITOP (для крепления используется всего 1 винт) однородность и равномерность слоя пасты между основанием модуля и теплоотводом особенно важна.



**Рис. 3.** Механическая деформация и распределение прижимающего усилия SEMITOP 4

Применение модулей с керамическим основанием предъявляет особые требования к качеству поверхности радиатора. Неравномерность поверхности тепловода для обеспечения заданных тепловых характеристик не должна превышать 20 мкм, шероховатость — 6 мкм, а толщина слоя теплопроводящей пасты должна составлять 20–25 мкм для модулей SEMITOP 1, 30–35 мкм для SEMITOP 2 и 40–55 мкм для SEMITOP 3 и 4.

Благодаря использованию новой керамической DBC-платы тепловое сопротивление «кристалл–теплоотвод» удалось снизить почти на 20%. Например, значение  $R_{th(j-s)}$  для модуля SK75GD126T с током 75 А (инвертор IGBT в корпусе SEMITOP 4) составляет 0,39  $^\circ\text{C}/\text{Вт}$ . При установке таких же чипов в конструктив SEMITOP 3 тепловое сопротивление увеличивается до 0,49  $^\circ\text{C}/\text{Вт}$ , то есть разница составляет около 20%. Меньшее значение теплового сопротивления означает, прежде всего, что транзисторы с тем же размером кристалла допускают большее значение тока или имеют меньший перегрев при аналогичном токе. Из-за отсутствия базовой платы для модулей SEMITOP в технических характеристиках приводится только значение сопротивления «кристалл–теплоотвод»  $R_{th(j-s)}$ , тепловое сопротивление «кристалл–корпус»  $R_{th(j-c)}$  имеет в данном случае лишь «виртуальный» смысл.

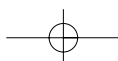
Чтобы повысить механическую прочность конструктива SEMITOP, необходимо свести к минимуму механические нагрузки, действующие на тонкую и хрупкую керамическую плату. Напомним, что DBC-пластина в силовых модулях выполняет две важнейшие функции: она осуществляет отвод тепла от силовых кристаллов на радиатор и обеспечивает электрическую изоляцию токоведущих частей модуля. Разработка конструкции SEMITOP 4 проводилась с помощью компьютерного моделирования методом конечных элементов: анализировались различные варианты формы и материала корпуса. Такой анализ позволил упростить процесс проектирования и сократить время и стоимость разработки. В прежние времена для отработки технологии производства и поиска оптимального варианта требовалась дорогостоя-

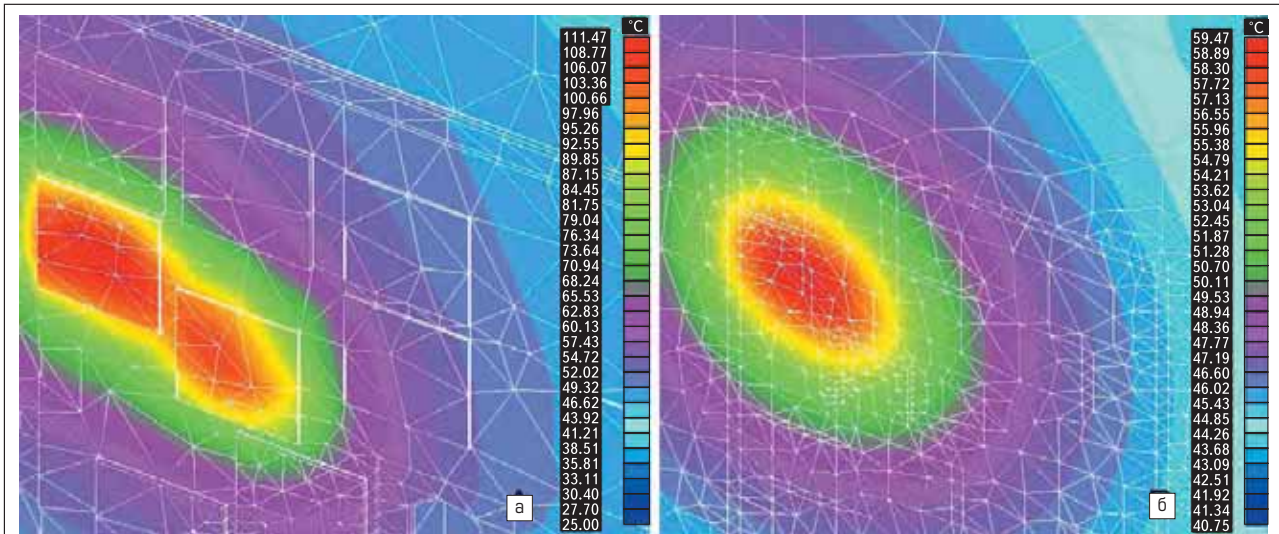
щая оснастка для изготовления и испытания образцов.

На рис. 3 представлены результаты анализа механических деформаций и прижимающего усилия, полученные при моделировании одного из вариантов корпуса из стандартного полимерного материала ABS. Цветная диаграмма показывает, что центральное крепление с номинальным моментом затяжки вызывает чрезвычайно высокую деформацию корпуса (около 1,3 мм). Замена полимера ABS на более прочный материал GF и модификация конструкции позволяют снизить уровень деформации и обеспечить высокую равномерность прижимающего усилия.

Как было сказано выше, современный рынок силовой электроники характеризуется растущей плотностью мощности силовых ключей при одновременном снижении их стоимости. Столь жесткие и противоречивые требования делают моделирование тепловых процессов одним из важнейших этапов проектирования малабаритных модулей. Кроме расчета статических и динамических тепловых импедансов необходимо исследовать «вторичные тепловые феномены», такие как температурные взаимодействия, а также тепловые контуры и краевые эффекты для каждого элемента конструкции. Должны учитываться не только указанные параметры, но и их возможные комбинации — только так можно обеспечить надежную и безопасную работу модуля.

До настоящего времени расчет тепловых сопротивлений при параллельном соединении чипов производился на основании эмпирически найденных поправочных коэффициентов. Такой метод не позволяет учесть сложные тепловые процессы, происходящие в модуле, и эффекты модуляции, вызываемые ими. С появлением новых программных средств разработки, производящих моделирование по методу конечных элементов (МКЭ), стала возможна генерация моделей конечных элементов (FEM — finite element models) из 3D или 2D CAD-файлов. МКЭ является сеточным методом, предназначенным для решения задач микроуровня, для которого модель объекта задается системой дифференциальных уравнений в частных производных с заданными краевыми



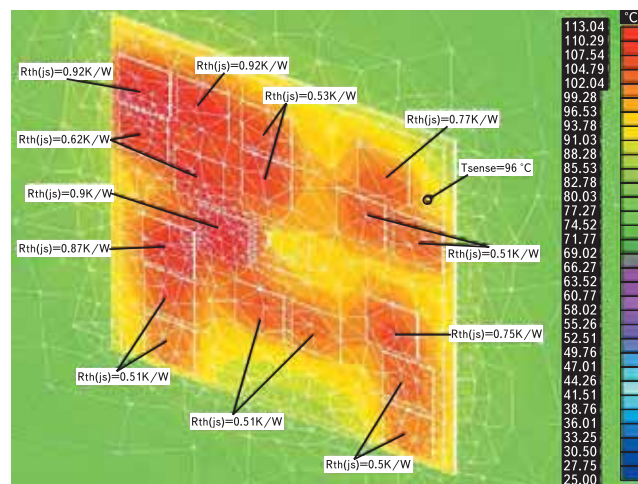


**Рис. 4.** Тепловые контуры, полученные при измерении теплового сопротивления  $R_{th(j-s)}$  модуля SK100GD126T: а) температура кристалла ( $T_{jmax} = 111,47\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), б) температура радиатора ( $T_{smax} = 59,47\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

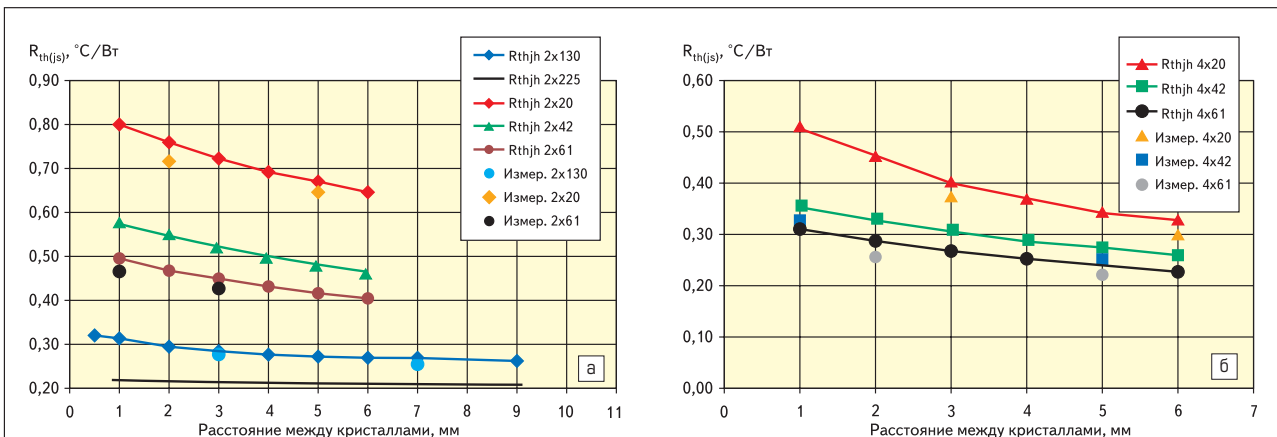
условиями. Теперь детальный тепловой анализ конструкции, подобной SEMITOR, при наличии достаточно мощного ПК и использовании большого количества конечных элементов можно произвести за несколько часов.

С помощью такого программного обеспечения можно, например, определить значение теплового сопротивления для каждого кристалла и каждого конструктивного слоя и исключить таким образом возникновение зон локального перегрева. Сравнение результатов, полученных в результате измерений и моделирования, показывает, что разница значений не превышает 2%.

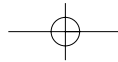
Цветные диаграммы, приведенные на рис. 4, получены в результате исследования тепловых контуров, образующихся в области кристалла IGBT и на теплоотводе под чипом. Мощность, рассеиваемая модулем SK100GD126T при измерениях, составляла 121,6 Вт. Горизонтальные координаты всех точек измерения на диаграммах А и В совпадают, вертикальное сканирование температуры чипа показывает, что в разных точках она может изменяться на несколько градусов (от 114 до 96 °C).



**Рис. 5.** Результаты моделирования теплового сопротивления  $R_{th(j-s)}$  кристаллов модуля SK100GD126T с учетом условий эксплуатации



**Рис. 6.** Зависимость теплового сопротивления  $R_{th(j-s)}$  от расстояния между кристаллами: а) 2 параллельных чипа разных размеров; б) 4 параллельных чипа разных размеров



Совсем другую картину, полученную в результате моделирования того же модуля в составе инвертора привода по методу FEA, можно увидеть на рис. 5. На диаграмме видно, что значение динамического теплового импеданса  $R_{th(j-s)}$  в значительной степени колеблется в зависимости от условий работы из-за наличия температурной интерференции и искажений тепловых контуров, вызванных изменением соотношения мощности рассеяния IGBT и антипараллельного диода. Диаграмма содержит «виртуальный» датчик температуры ( $T_{sense}$ ), установленный в правом верхнем углу модели. В данном случае он показывает, что температура в точке измерения равна 96 °С, и это на 17 °С ниже температуры самой нагретой точки модуля. Метод FEA позволяет помещать датчик в различные точки анализируемой конструкции, благодаря чему можно с высокой точностью прогнозировать изменение  $T_j$  и  $R_{th}$  в зависимости от различных воздействующих факторов.

С помощью программного обеспечения, использующего МКЭ, возможно определить коэффициенты коррекции, которые позволят рассчитать тепловое сопротивление  $R_{th(j-s)}$  силового модуля с учетом действия «вторичных тепловых феноменов» и их комбинаций. Например, на рис. 6 показана зависимость теплового сопротивления «кристалл — радиатор»  $R_{th(j-s)}$  от расстояния между двумя (а) и четырьмя (б) параллельно включенными кристаллами разного размера, установленными на одинаковом алюминиевом радиаторе. Достоверность приведенных данных была проверена с помощью сравнительных измерений соответствующих параметров модулей SEMITOP 2 и SEMITOP 3 по методике, изложенной в международном стандарте IEC 747-8/2.18.

В ходе моделирования было также установлено, что корректирующие коэффициенты, а, следовательно, и тепловые сопротивления, в высокой степени зависят от формы и размера кристаллов, а также от их взаимного расположения и расстояния до края керамической подложки. При одном и том же уровне рассеиваемой мощности и одинаковых условиях измерения тепловое сопротивление параллельных кристаллов, соприкасающихся короткими сторонами, на 5–16% ниже, чем в случае их контакта по длинной стороне. Указанная разница, естественно, зависит от количества параллельно соединенных кристаллов и расстояния между ними, что показывают графики на рис. 7. Кривые демонстрируют зависимость параметра  $R_{th(j-s)}$  от расстояния между чипами при их различном взаимном положении. Вероятной причиной такого результата может быть интерференция тепловых контуров. Для исключения краевого эффекта моделирование выполнялось при условии, что расстояние от чипов до краев DCB-керамики больше 5 мм. Проведенный анализ позволяет сделать интересный вывод: тепловое сопротивление при параллельном соединении прямоугольных кристаллов меньше, чем для чипов квадратной формы при аналогичной суммарной площади кремния.

Номенклатура предлагаемых в настоящее время компонентов SEMITOP 4 пока невелика, основные характеристики имеющихся типов

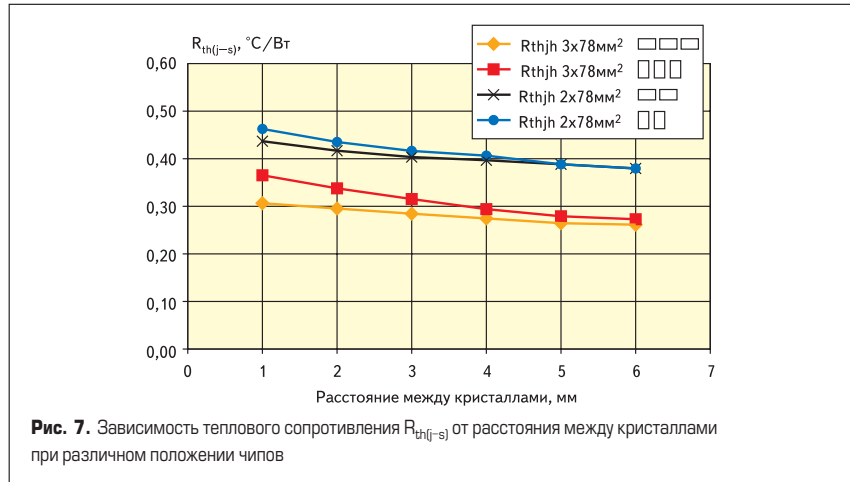


Рис. 7. Зависимость теплового сопротивления  $R_{th(j-s)}$  от расстояния между кристаллами при различном положении чипов

Таблица 2. Номенклатура модулей SEMITOP 4

Тип модуля	$I_{Cmax}$ при 25 °С, А	$V_{CE(sat)}$ при 25 °С, В	$(E_{ON} + E_{OFF})$ при 125 °С, мДж	$R_{th(j-s)}$ °С/Вт	Схема
Trench 600 В					
SK 75 GD 066 T	75	1,45	5,7	0,75	
SK 100 GD 066 T	96	1,45	6,9	0,65	
SK 150 GD 066 T	137	1,45	11,4	0,55	
SK 200 GD 066 T	158	1,45	13,8	0,45	
Trench 1200 В					
SK 50 GD 126 T	68	1,7	12,1	0,6	
SK 75 GD 126 T	88	1,7	16,7	0,5	
SK 100 GD 126 T	114	1,7	26,1	0,4	
Trench 600 В					
SK 50 DGDL 066 T	69	1,45		0,95	
SK 75 DGDL 066 T	81	1,45		0,75	
SK 100 DGDL 066 T	106	1,45		0,65	
Trench 1200 В					
SK 25 DGDL 126 T	41	1,7		0,9	
SK 35 DGDL 126 T	52	1,7		0,75	
SK 50 DGDL 126 T	68	1,7		0,6	

приведены в таблице 2. Модули выпускаются в конфигурациях: 3-фазный инвертор IGBT и CIB, в них использованы Trench-кристаллы с рабочим напряжением 600 и 1200 В. Однако сам факт того, что в корпусе, площадь которого примерно соответствует пространству, занимаемому шестью транзисторами TO-247 (без учета соединения), размещен инвертор с номинальным током более 150 А, говорит об уникальности разработки.

Модули SEMITOP теперь можно считать не только самыми мощными (в своем классе, конечно), но и самыми быстрыми. До настоящего времени силовые ключи, предназначенные для высокочастотных применений, изготавливались по технологии WARP (дискретные транзисторы IGBT International Rectifier) и UltraFast NPT.

В конце 2005 года компанией SEMIKRON было объявлено о начале производства в кон-

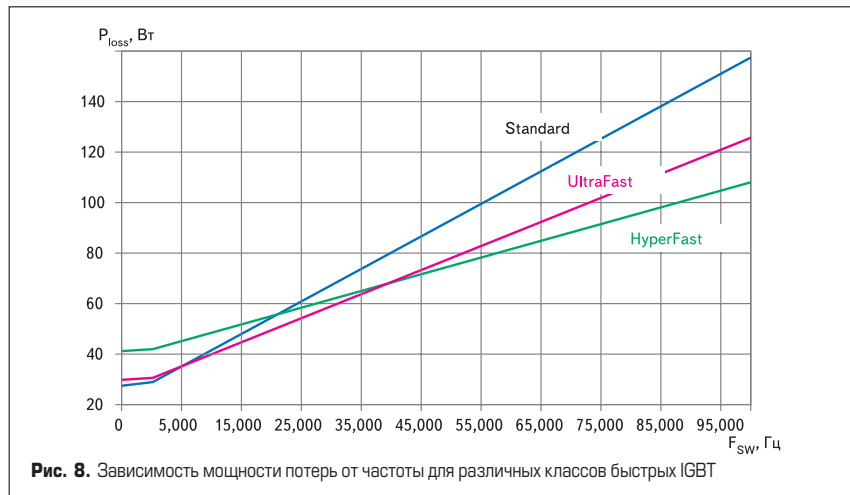
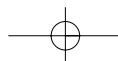


Рис. 8. Зависимость мощности потерь от частоты для различных классов быстрых IGBT



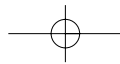


Таблица 3. Номенклатура модулей HyperFast (600 В)

Тип модуля	$I_{Cmax}$ при 25 °С, А	$V_{CEsat}$ при 25 °С, В	$E_{on}+E_{off}$ при 125 °С, мДж	$R_{th(j-c)/}$ °С/Вт	Схема
SK 30 GAL 067	45	2,8	3,4	0,85	
SK 40 GAL 067	62	2,8	5,1	0,6	
SK 50 GAL 067	83	2,8	6,7	0,45	
SK 30 GAR 067	45	2,8	3,4	0,85	
SK 40 GAR 067	62	2,8	5,1	0,6	
SK 50 GAR 067	83	2,8	6,7	0,45	
SK 30 GB 067	45	2,8	3,4	0,85	
SK 40 GB 067	62	2,8	5,1	0,6	
SK 50 GB 067	83	2,8	6,7	0,45	
SK 30 GH 067	45	2,8	3,4	0,85	
SK 30 GARL 067 E	45	2,8	3,4	0,85	

Таблица 4. Виды и условия испытаний модулей SEMITOP

Испытание	Условия испытаний	Стандарт
Повышенная температура при повышенном напряжении (THRБ)	125 °С ≤ T <sub>c</sub> ≤ 145 °С 95% V <sub>CEmax</sub> ; T <sub>i</sub> = 1000 ч	IEC 60747
Повышенная температура при повышенном напряжении на затворе (HTGB)	T <sub>jmax</sub> ± VGE = 20 В; T <sub>i</sub> = 1000 ч	IEC 60747
Повышенная температура при повышенной влажности (ТНВ)	T = 85 °С, H = 85% RH; V <sub>CE</sub> = 80 В; V <sub>GE</sub> = 0; T <sub>i</sub> = 1000 ч	IEC 60068-2-67
Повышенная температура хранения (HTS)	T <sub>stgmax</sub> ; T <sub>i</sub> = 1000 ч	IEC 60068-2-2
Пониженная температура хранения (LTS)	T <sub>stgmin</sub> ; T <sub>i</sub> = 1000 ч	IEC 60068-2-1
Термоциклирование (ТС)	100 циклов; T <sub>stgmin</sub> - T <sub>stgmax</sub>	IEC 60068-2-14 Test NA
Циклическая нагрузка мощностью (PC)	20 000 циклов; ΔT <sub>i</sub> = 100 К	IEC 60749-34
Синусоидальная вибрация	5 г, 2 ч по каждой оси	IEC 60068-2-8 Test Fc
Удары (полусинусоидальные импульсы)	30 г, 3 раза в двух направлениях по каждой оси	IEC 60068-2-8 Test Ea

структуре SEMITOP сверхбыстрых модулей IGBT семейства HyperFast, предназначенных для работы на частотах свыше 30 кГц. Модули серии 067 с рабочим напряжением 600 В, рассчитанные на применение в диапазоне мощности до 20 кВт, уже появились в производственной программе компании. Они выпускаются в различных конфигурациях, включая полумосты, чопперы и однофазные мосты.

Как показывают графики зависимости мощности потерь от частоты переключения, приведенные на рис. 8, преимущества модулей HyperFast наиболее ярко проявляются на частотах выше 30–40 кГц. На меньших частотах их применение нецелесообразно из-за достаточной высокой потери проводимости. Прямое падение напряжения V<sub>CEsat</sub> для ключей серии 067 составляет примерно 2,8 В при номинальном токе, зато энергия переключения у них снижена почти на 30% по отношению к компонентам класса UltraFast NPT.

Чтобы добиться максимальной эффективности применения модулей HyperFast на высоких

частотах, компанией SEMIKRON было разработано новое поколение сверхбыстрых антипараллельных диодов, названных Turbo 2. По сравнению с диодами серии CAL предыдущего поколения в новых компонентах величина Q<sub>rr</sub> снижена в 3 раза, а значение пикового тока обратного восстановления I<sub>RRM</sub> — почти в 2 раза при одновременном уменьшении V<sub>F</sub> на 25–30% (при температуре кристалла 125 °С)! Номенклатура модулей класса HyperFast с рабочим напряжением 600 В, предлагаемых в настоящее время, приведена в таблице 3.

Как и все компоненты, производимые SEMIKRON, модули SEMITOP проходят 100%-ный выходной контроль. В таблице 4 приведены виды и условия испытаний на надежность, которым подвергаются после изготовления модули SEMITOP.

#### Заключение

Несомненным преимуществом интегральных модулей является то, что элементы них

соединены в определенной конфигурации — это позволяет упростить сборку, обеспечивает минимальное значение распределенных индуктивностей и, следовательно, — уменьшение переходных перенапряжений при переключении. Особенно наглядно это проявляется в отношении малогабаритных модулей SEMITOP, применение которых вместо дискретных корпусов ТО позволяет в 2–4 раза увеличить мощность преобразовательного устройства при аналогичных габаритах силового каскада. Достигнутый результат был бы невыносим без применения новейшего программного обеспечения, позволяющего проводить многовариантный анализ тепловых и механических свойств конструкции и обеспечить надежную работу силовых ключей в предельных условиях эксплуатации.

Разработка нового конструктива SEMITOP 4 позволила SEMIKRON расширить диапазон допустимых мощностей для данного семейства IGBT до 22 кВт, что более чем в 3 раза превышает возможности типоразмера SEMITOP 3 в приводных применениях. Модули 4-го типоразмера доступны в конфигурациях: 3-фазный инвертор MOSFET/IGBT и CIB (выпрямитель — инвертор — тормозной каскад) при токе до 200 А (рабочее напряжение 600 В) и 100 А для 1200-вольтовых ключей. В скором будущем компоненты семейства SEMITOP 4 также будут выпускаться с кристаллами новейшего поколения Trench 4 IGBT, что приведет к дальнейшему увеличению мощностных характеристик конструктива.

Модули SEMITOP широко применяются в устройствах, выпускаемых компаниями Segway, LG Electronics, Alcatel. По данным исследований рынка силовых полупроводниковых компонентов The worldwide market for Power Semiconductors 2002, проведенных британским исследовательским институтом IMS (British Market Research Institute), в области производства миниатюрных модулей CIB доля рынка SEMIKRON составляет 30% в мире и более 46% — в Европе. Существенным достоинством модулей SEMITOP является необычайно высокое количество конфигураций, перекрывающих практически все потребности разработчиков. Многие производители электронной аппаратуры справедливо считают, что на этапе разработки использование дискретных компонентов более оправдано. Однако снижение издержек при серийном производстве, упрощение процесса изготовления и более высокие показатели надежности, несомненно, стоят того, чтобы в конечном итоге отдать предпочтение интегральным модулям.

#### Литература

1. SEMITOP®. Cool Components. Semikron International.
2. Brucchi F. One screw mounting SEMITOP power modules design. Semikron Italia.
3. Curamik: «Design Rules of Curamik DBC Substrates». Ed. 04/2003.
4. Колпаков А. SEMITOP как альтернатива ТО // Силовая электроника. 2004. № 2.

