

Trench 4 —

первая универсальная технология IGBT

Особенностью непрерывно растущего рынка частотных преобразователей является широкая номенклатура типов и версий, имеющих различные конструктивы, электрические параметры, сервисные функции. В первую очередь технический уровень подобных устройств зависит от свойств используемых силовых ключей. Электрические и тепловые характеристики модулей IGBT во многом определяют класс и область применения преобразователей частоты. Использование новых типов кристаллов IGBT в стандартных силовых модулях позволяет разработчикам увеличить техническую эффективность и мощностные характеристики конвертеров без изменения их конструкции.

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Семейство стандартных модулей IGBT в производственной программе SEMIKRON носит название SEMITRANS. До недавнего времени компания предлагала 5 типов этих силовых ключей, отличающихся корпусом, тепловыми характеристиками, уровнем статических и динамических потерь. Это позволяло пользователям выбирать элемент, обеспечивающий минимальное значение рассеиваемой мощности для конкретных условий эксплуатации. Специально для упрощения процесса выбора элементной базы SEMIKRON разработала программу автоматического теплового расчета SemiSel (Semiconductor Select), которая доступна на сайте www.semikron.com.

Термин «стандартный модуль» подразумевает в первую очередь типовой конструктив со стандартизованным способом крепежа и расположением выводов, что дает возможность разработчикам использовать широкую гамму компонентов от разных поставщиков. На рис. 1 показан внешний вид модулей SEMITRANS 3 (62 мм) и SEMiX 3, который становится новым промышленным стандартом благодаря своим очевидным конструктивным преимуществам. В настоящее время модули такого типа есть в производственной программе многих ведущих производителей компонентов для силовой электроники: SEMIKRON, EUPEC/Infineon, Fuji.

Предлагаемая статья рассказывает о возможностях, раскрываемых стандартными силовыми ключами при установке в них кристаллов IGBT и диодов последних поколений. Мы рассмотрим этот вопрос на примере новой генерации SEMITRANS T4 с чипами IGBT⁴ от Infineon и антипараллельными диодами CAL⁴ производства SEMIKRON.

О качестве работы силовых модулей в импульсных режимах можно судить по степени приближения их характеристик к параметрам так называемых «идеальных ключей», которые имеют:

- нулевое падение напряжения в состоянии проводимости $V_{on} = 0$ независимо от величины протекающего тока;

- нулевой ток утечки в закрытом состоянии $I_r = 0$ в пределах нормированного обратного напряжения;

- нулевые потери переключения $P_{sw} = 0$, независимо от величины коммутируемого тока и напряжения.

При выполнении данных условий тепловое сопротивление R_{th} не имеет значения, так как отсутствуют потери мощности. Главным отличием реальных силовых модулей является наличие потерь проводимости и переключения, оказывающих существенное влияние на эффективность их работы и КПД всего преобразователя. Большое значение в данном случае имеет и величина теплового сопротивления, определяющая перегрев кристаллов и ограничивающая предельную величину рабочего тока.

На рис. 2 показано устройство кристаллов новейшего поколения IGBT, производимых по технологии Trench FS (Field Stop) IGBT⁴ [1, 2], и структура разработанных SEMIKRON диодов четвертого поколения CAL⁴ [3, 4].

Кристаллы IGBT⁴ созданы на основе Trench-технологии 3 поколения, которая используется при производстве модулей SEMIKRON 066, 126 и 176 серий с рабочим напряжением 600, 1200 и 1700 В соответственно. Эти компоненты отличаются очень хорошими характеристиками проводимости: напряжение насыщения V_{CEsat} модулей 126 серии при номинальном токе и температуре 25 °C не превышает 1,7 В, а для компонентов 066 серии $V_{CEsat} = 1,45$ В. Однако



Рис. 1. Внешний вид модулей IGBT SEMITRANS 3 и SEMiX 3

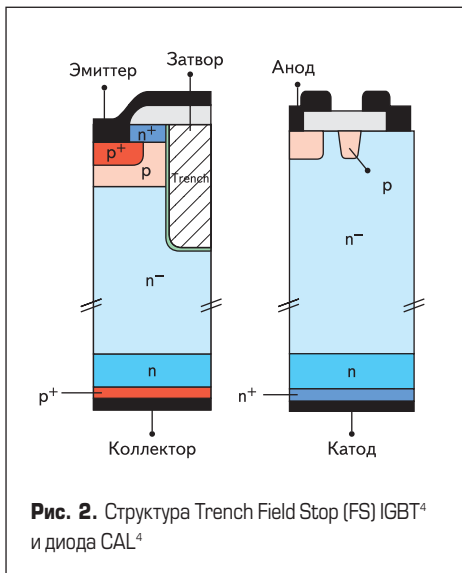


Рис. 2. Структура Trench Field Stop (FS) IGBT⁴ и диода CAL⁴

уровень динамических потерь у них достаточно высок, и в режиме «жесткой коммутации» применение ключей данного типа на частотах выше 5–7 кГц нецелесообразно.

Существенное улучшение характеристик было достигнуто благодаря оптимизации основных элементов вертикальной структуры чипа: базы n⁻, слоя n-Field Stop, предназначенного для повышения напряжения пробоя, и эмиттера. В результате модернизации Trench-технологии удалось снизить суммарное значение потерь в широком диапазоне частот и обеспечить более плавный характер переключения. При этом новые чипы занимают меньшую площадь, при их производстве требуется меньше кремния, что способствует повышению выхода годных и снижению себестоимости продукции.

Не менее важным достижением является увеличение допустимой рабочей температуры T_{jmax} кристаллов с 150 до 175 °С. Благодаря этому применение нового поколения модулей IGBT позволяет увеличить запас по перегрузке в динамических режимах и повысить надежность работы преобразователей. Семейство модулей IGBT⁴ с оптимизированной вертикальной структурой предназначено для использования в диапазоне рабочих токов 50–600 А, их преимущество наиболее полно проявляется при работе на частотах 4–12 кГц.

Для того чтобы модернизированные кристаллы IGBT наиболее полно проявили свои преимущества, они должны использоваться с антипараллельными диодами, согласованными с ними по плотности мощности, статическим и динамическим характеристикам. Для решения этой задачи фирмой SEMIKRON было создано четвертое поколение быстрых диодов на основе собственной технологии CAL (Controlled Axial Lifetime), главными особенностями которой являются плавный характер переключения во всем диапазоне рабочих токов, высокий иммунитет к di/dt и малый ток обратного восстановления.

При разработке CAL-диодов основное внимание уделялось обеспечению плавной кривой обратного восстановления di_{rr}/dt и согласованию характеристик восстановления с динамическими свойствами IGBT. Благодаря применению антипараллельных диодов CAL в модулях IGBT удастся не только снизить уро-

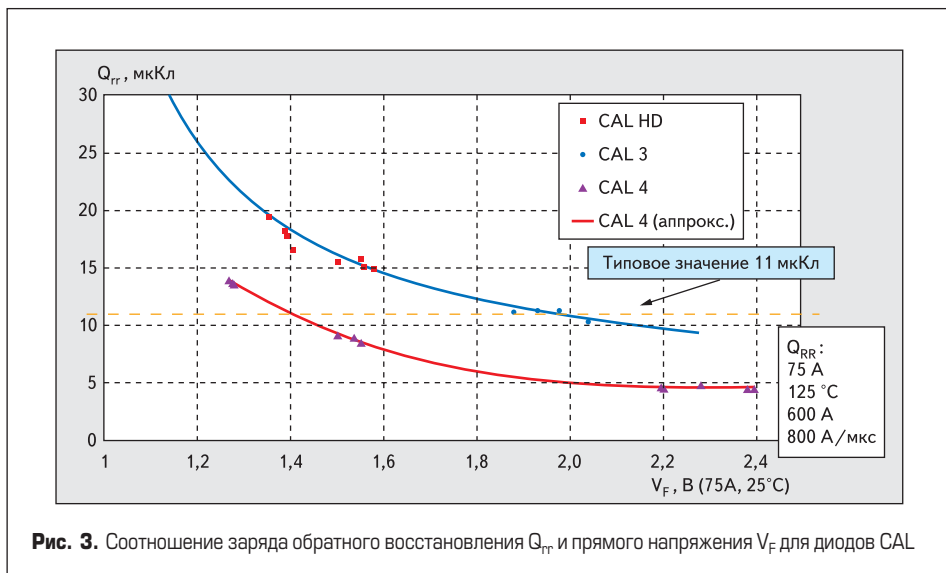


Рис. 3. Соотношение заряда обратного восстановления Q_{rr} и прямого напряжения V_F для диодов CAL

вень статических и динамических потерь, но и обеспечить хорошую электромагнитную совместимость.

По своей конструкции кристалл CAL (рис. 2) представляет собой тонкую подложку n⁻ с буферным слоем n/n⁺ в области катода. Для снижения потерь проводимости в чипах нового поколения была уменьшена толщина слоя n⁺, увеличена активная площадь поверхности (за счет уменьшения размеров краевых областей), а также оптимизировано время жизни носителей.

Усовершенствование структуры кристаллов позволило на 30% повысить допустимое значение плотности тока, при этом потери переключения остались на уровне, достигнутом в диодах предыдущего поколения CAL³. На рис. 3 показано соотношение заряда обратного восстановления Q_{rr} и прямого падения напряжения V_F для диодов различных поколений. Сочетание этих параметров позволяет наиболее полно оценить качественные показатели диодов, используемых в инверторах совместно с IGBT. Кривые дают наглядное представление о комплексном улучшении характеристик, достигнутом при разработке диодов CAL⁴.

Использование нового способа пассивации DLC (Diamond Like Carbon) дало возможность увеличить значение предельной рабочей температуры чипов до 175 °С, что позволило добиться наилучшего согласования параметров диодов CAL⁴ с характеристиками IGBT Trench 4. Надежность работы новых модулей IGBT в расширенном температурном диапазоне подтверждена специальными испытаниями, которые включают проверку тока утечки затвора и тока обратного смещения «коллектор–эмиттер», проведенную при предельной температуре (HTRB), а также предельной температуре и влажности (THB).

Сравнительные характеристики трех типов IGBT с рабочим напряжением 1200 В (NPT

IGBT с гомогенной структурой, Trench IGBT третьего и четвертого поколения) показаны в таблице 1.

Для корректности сопоставления компонентов разных поколений значение энергии потерь переключения E_{sw} в таблице дано при температуре кристалла T_j = 125 °С, а напряжение насыщения V_{CEsat} указано без учета потерь на терминалах. В то же время следует отметить, что все технические характеристики новых модулей, приведенные в спецификациях, нормированы для T_j = 150 °С.

С появлением силовых ключей нового поколения название Trench перестало быть синонимом низкочастотной технологии — модули серии T4 могут быть с успехом использованы практически во всем диапазоне приводных частот. Сказанное наглядно демонстрируется графиками, приведенными на рис. 4, где показана зависимость максимального выходного тока 3-фазного инвертора от частоты коммутации для различных типов IGBT:

- SKM 400GB123D — технология NPT;
- SKM 400GB126D — технология Trench 3;
- SKM 300GB12T4 — технология Trench 4;
- SKM 400GB128D — технология SPT.

Эпюра для модулей нового поколения (SKM 300GB12T4) во всем диапазоне частот практически совпадает с кривой предельного тока для силовых ключей, выполненных по широкополосной технологии SPT (SKM 400GB128D). Однако обратите внимание на то, что расчеты выполнены для максимальной температуры кристаллов 125 °С. Поскольку для компонентов серии T4 все режимы гарантируются при T_{jmax} = 150 °С, то соответственно максимально допустимый ток у них оказывается на 10–15% выше, чем у модулей 128 серии.

Несомненно, что выбор полупроводниковых кристаллов, стоимость которых обычно составляет более половины цены силового мо-

Таблица 1. Сравнительные характеристики IGBT различных поколений (рабочее напряжение 1200 В)

Параметр, единица измерения	NPT IGBT ³ (серия 123)	Trench IGBT ³ (серия 126)	Trench IGBT ⁴ (серия 12T4)
Напряжение насыщения V _{CEsat} , В (@ I _{Cnom} , 125 °С)	3,1	2	2,1
Энергия переключения E _{sw} , мДж (@ 100 А, 125 °С)	28	25	18,5
Относительный размер кристалла, % (@ I _{Cnom})	100	70	63
Температурный коэффициент V _{CEsat}	+	+	+
Заряд затвора, нКл (@ 100 А)	850	700	630

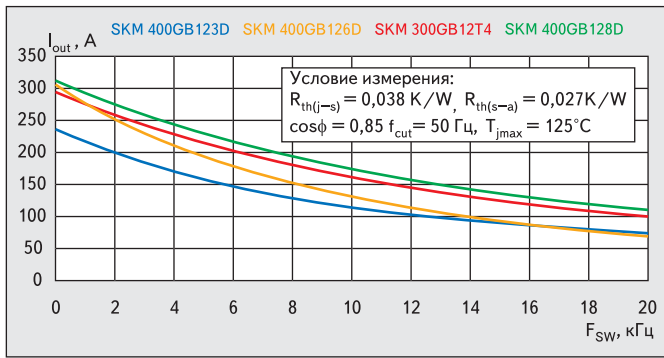


Рис. 4. Зависимость максимального тока инвертора от частоты для различных типов IGBT

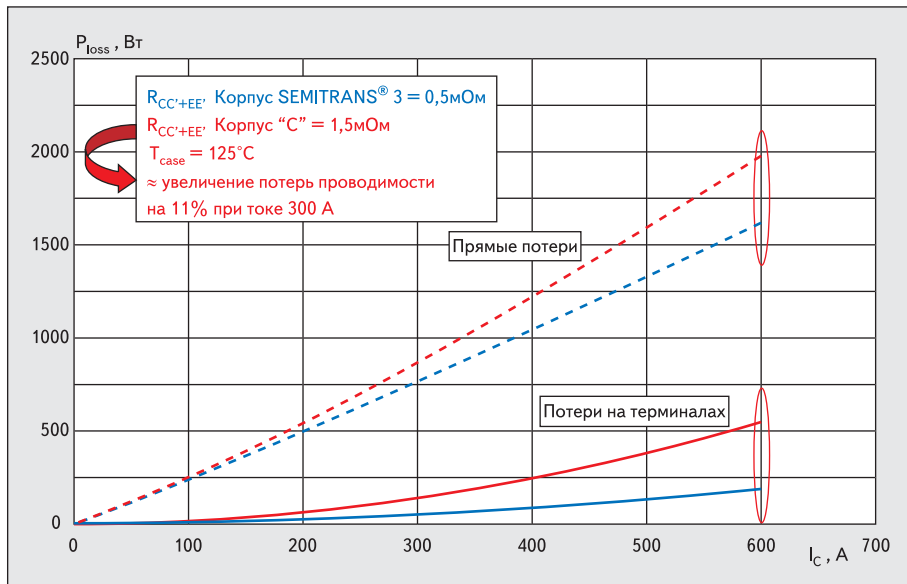


Рис. 5. Прямые потери на силовых ключах и активные потери на терминалах для разных типов корпусов

дуля, оказывает решающее влияние на его электрические характеристики. Тем не менее, от конструкции модуля, влияющей на его тепловые и частотные свойства, во многом зависят предельные значения тока и мощности си-

ловых ключей. В таблице 2 приведены основные параметры стандартных конструктивов IGBT SEMITRANS и указаны характеристики силовых каскадов, на которые они оказывают прямое воздействие.

Таблица 2. Основные параметры конструктивов SEMITRANS (ST2...ST4) и их воздействие на работу преобразователей

Описание	Параметр	ST 2	ST 3	ST 4	Воздействие
Омическое сопротивление силовых терминалов	R_{CC+EE} 25 °C (125 °C)	0,75 мОм (1 мОм)	0,35 мОм (0,5 мОм)	0,18 мОм (0,22 мОм)	КПД
Тепловое сопротивление в течение срока службы	$R_{th(c-s)}$	0,05	0,038	0,038	Выходная мощность
Электрическая прочность изоляции	V_{isol}	4 кВ / 1 мин	4 кВ / 1 мин	4 кВ / 1 мин	Безопасность, надежность
Количество параллельно включенных чипов (в модуле), обеспечивающее симметрию токов	–	1	4	8	Выходная мощность при предельных токах
Количество параллельно включенных модулей, обеспечивающее симметрию токов	–	12	10	4	Выходная мощность

Таблица 3. Влияние активного сопротивления терминалов модулей

R_{CC+EE}	0,5 мОм		1,5 мОм		2 мОм	
	I_{out} , А	P_w , Вт	I_{out} , А	P_w , Вт	V_{CEsat} , В	dV_{CEsat} , мВ
50	1	4	25	75	2,03	101
100	5	15	50	150	2,05	205
200	20	60	100	300	2,10	420
300	45	135	150	450	2,15	645
400	80	240	200	600	2,20	880
500	125	375	250	750	2,25	1125
600	180	540	300	900	2,30	1380

Активное сопротивление соединительных шин

Мало кто задумывается о влиянии активного сопротивления силовых терминалов R_{CC+EE} на эффективность работы силового модуля. Между тем мощность, рассеиваемая на этом сопротивлении, вносит заметный вклад в значение КПД. На рис. 5 представлены графики зависимости уровня прямых потерь на силовых ключах и активных потерь на подводящих шинах от тока для 2 типов корпусов: SEMITRANS 3 и стандартного конструктива 62 мм (С) с типовым значением $R_{CC+EE} = 1,5$ мОм. Дополнительная мощность рассеивания P_w , вызванная наличием активного сопротивления терминалов, увеличивает суммарные потери на 11% при токе 300 А, что эквивалентно примерно 270 Вт при пересчете на 3-фазный инвертор. Значение R_{CC+EE} для различных типов модулей SEMITRANS дано в таблице 2.

В таблице 3 приведены расчетные данные величины P_w и перепада напряжения dV_{CEsat} , образующихся на активном сопротивлении выводов различного типа корпусов. В последнем столбце таблицы показано типовое значение напряжения чипов и его градиента, образующегося при протекании тока I_{out} по внутренним шинам модуля, имеющим суммарное сопротивление 2 мОм. Обратите внимание, что при токе 600 А добавочное падение напряжения dV_{CEsat} составляет более 50% от напряжения насыщения кристалла IGBT.

Тепловое сопротивление

Одним из важнейших параметров конструктива силового модуля является тепловое сопротивление R_{th} , которое определяет градиент температуры ΔT , образующийся при рассеянии мощности P_D , в соответствии с выражением: $\Delta T = P_D \times R_{th}$. Его значение непосредственно влияет на уровень перегрева кристаллов и величину максимального допустимого тока ключа. Суммарная величина теплового сопротивления зависит от следующих факторов:

- площади кристаллов;
- конструкции модуля (типа соединений, материал DCB керамики и базовой платы);
- тепловой конструкции сборки (типа и толщины слоя теплопроводящей пасты, конструкции и материала радиатора, способа охлаждения).

Значение теплового сопротивления «корпус–теплосток» $R_{th(c-s)}$ для различных типов модулей SEMITRANS приведено в таблице 2.

Паразитная индуктивность

Распределенная паразитная индуктивность выводов L_{CE} непосредственно влияет на частотные свойства силового модуля и уровень перенапряжения, возникающий при выключении IGBT. От этого параметра во многом зависит надежность работы преобразователя в динамических режимах, самым тяжелым из которых является режим отключения при коротком замыкании (КЗ или SC — short

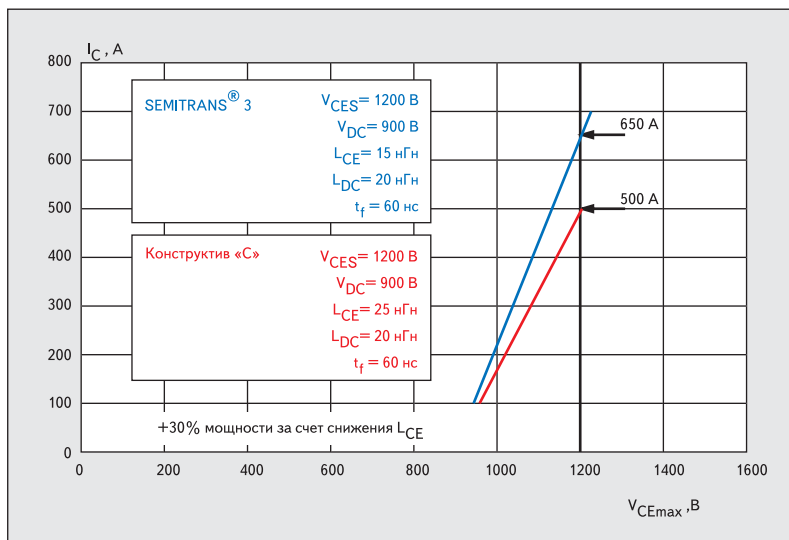


Рис. 6. Влияние индуктивности модуля на максимальный ток выключения

circuit), ток которого I_{sc} в 5–10 раз может превышать номинальное значение.

Так же как величина индуктивности L_{DC} подводящих шин питания преобразователя во многом характеризует уровень проработки конструкции, внутренняя индуктивность модуля L_{CE} является важной характеристикой качества конструктива модуля. При известном значении напряжения на выводах питания $V_{CE_Terminal}$ напряжение на кристалле V_{CEmax_Chip} может быть определено по формуле:

$$V_{CEmax_Chip} = V_{CE_Terminal} + L_{CE} \cdot dI_C/dt$$

На практике это означает, что при выключении IGBT на кристаллах создается дополнительное перенапряжение относительно терминалов модуля, зависящее от скорости выключения dI_C/dt и распределенной индуктивности. Следует отметить, что всплески напряжения образуются и при включении, что обусловлено наличием броска тока обратного восстановления оппозитных диодов. Для оценки этого эффекта в приведенной формуле dI_C/dt следует заменить на dI_{tr}/dt , где I_{tr} — ток обратного восстановления диода.

Опасность наведенных переходных перенапряжений возрастает с увеличением напряжения на шине питания V_{DC} . В реальной работе такая ситуация может возникнуть при повышении уровня сетевого питания или внезапном сбросе нагрузки в преобразователе, работающем в режиме обратной связи по току или мощности.

Использование силовых модулей с низким значением индуктивности выводов позволяет повысить надежность и эффективность за счет работы при большем значении V_{DC} . На рис. 6 показано сравнение допустимого тока выключения при напряжении на звене постоянного тока $V_{DC} = 900$ В для низкоиндуктивного модуля SEMITRANS[®] 3 и типового силового ключа «С» в стандартном конструктиве 62 мм. В обоих случаях индуктивность подводящих шин L_{DC} одинакова. Как показывают графики, благодаря уменьшению величины L_{CE} всего на 10 нГн, допустимый ток выключения для модуля IGBT SEMIKRON

с рабочим напряжением 1200 В оказывается выше на 150 А, что эквивалентно прибавке мощности в 30%.

Снижение значения распределенной индуктивности модулей SEMITRANS[®] 3 достигнуто за счет оптимизации формы терминалов и применения копланарных (плоско-параллельных) шин, работающих подобно бифилярным проводникам (рис. 7). Необходимо отметить, что из-за наличия L_{CE} напряжение на чипах в динамических режимах всегда будет превышать напряжение на терминалах, именно поэтому V_{DC} всегда меньше V_{CE} . Предельно допустимую величину напряжения питания можно определить по графикам области безопасной работы (ОБР или SOA — Safe Operating Area) для конкретного типа ключа. Расширение рамок ОБР силовых ключей достигается за счет разработки низкоиндуктивных конструктивов и уменьшения скорости переключения IGBT.

В модулях SEMITRANS[®] для наращивания тока используется параллельное соединение чипов, в одном силовом ключе в параллель может быть включено до 8 кристаллов IGBT и диодов (табл. 2). Выравнивание токов IGBT в статических режимах происходит автоматически благодаря положительному температурному коэффициенту напряжения насыщения. Симметричная работа параллельно включенных диодов, имеющих отрицательный тепловой коэффициент прямого падения напряжения V_F , как правило, достигается с помощью подбора чипов по этому параметру.

Для решения данной проблемы в модулях Trench 3 и 4 поколения применяются кристаллы CAL HD и CAL⁴, имеющие положительный коэффициент V_F в области номинальных и предельных токов. В результате этого чипы диодов, установленных внутри модуля, используются при максимальной токовой нагрузке. При соединении в параллель модулей IGBT семейства SEMITRANS рекомендуемый коэффициент снижения номинального тока составляет 90–95%.

Заключение

Модули IGBT в стандартных конструктивах еще долго будут востребованы рынком, поэтому над их модернизацией работают практически все фирмы-изготовители. В производственной программе SEMIKRON семейство стандартных IGBT-модулей носит название SEMITRANS, а сами корпуса называются SEMITRANS 1...4 для одиночных и полумостовых конфигураций и SEMITRANS 6, 7 для 3-фазных мостов.

Технология Trench IGBT 3 поколения, используемая при производстве модулей SEMIKRON 126 и 176 серий, обеспечивает сверхнизкие статические потери. До недавнего времени характеристики проводимости этих ключей считались одними из лучших в своем классе, а сами модули были предназначены для использования на частотах переключения до 5–7 кГц. Усовершенствованная технология Trench 4 поколения позволяет расширить область рабочих частот, улучшить электрические параметры силовых ключей и одновременно уменьшить размер чипов. С появлением компонентов серии T4 термин Trench перестал быть синонимом низкочастотных ключей, теперь эти элементы претендуют на звание универсальных, широкополосных.

Ниже перечислены основные преимущества IGBT T4 по сравнению с модулями предыдущих поколений:

- плотность тока повышена до 125А/см²;
- энергия выключения снижена на 30%;
- снижен удельный заряд затвора;
- предельная температура кристалла повышена до 175 °С, что эквивалентно увеличению запаса по предельному току на 20–25%;
- скорость выключения dI/dt снижена примерно на 22%, что обеспечивает большую надежность в динамических режимах и позволяет работать при повышенном напряжении питания. (Этому способствует при-

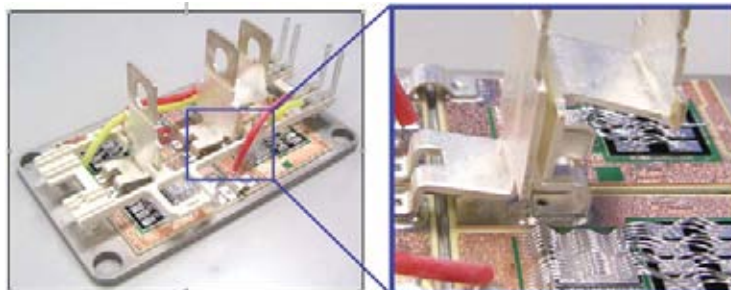


Рис. 7. Конструкция шин питания модуля SEMITRANS 3

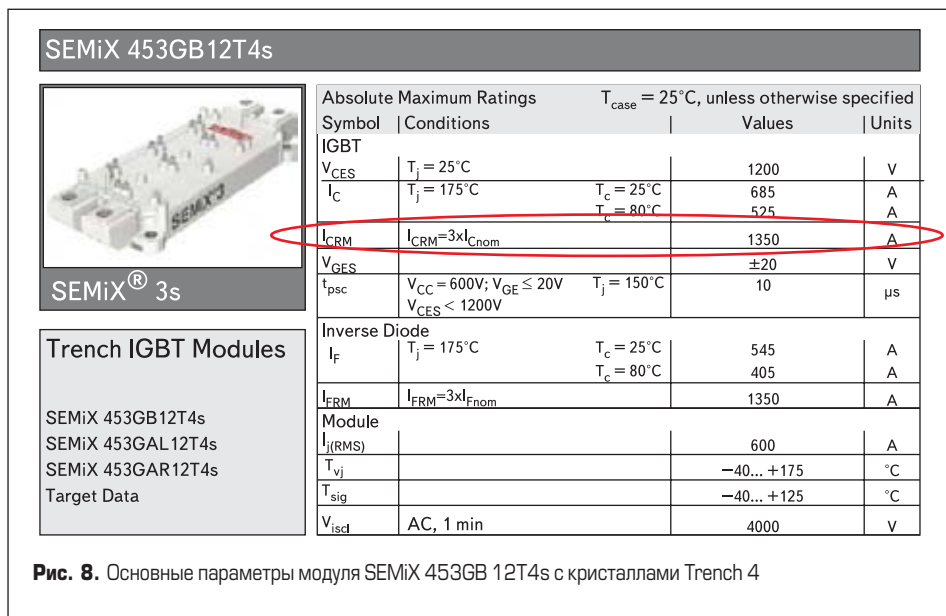


Рис. 8. Основные параметры модуля SEMIX 453GB 12T4s с кристаллами Trench 4

менение низкоиндуктивных конструктивов SEMITRANS/SEMIX, для модулей серии 12T4 безопасным считается напряжение V_{DC} = 900 В).

Улучшение характеристик модулей 4 поколения поколения достигнута не только благодаря применению новых кристаллов Trench 4 и CAL⁴, но и за счет собственных свойств конструктива SEMITRANS: низкого значения активного сопротивления и паразитной индуктивности. Выпуск компанией SEMIKRON силовых ключей семейства SEMITRANS T4 дает возможность повышать эффективность и мощность преобразователей, построенных на базе стандартных компонентов без пере-

делки конструкции и доработки системы охлаждения.

Кристаллы Trench 4 предполагается использовать также при выпуске нового поколения IGBT SEMIX, популярность которого на рынке неуклонно растет. Фрагмент технических характеристик модуля SEMIX 453GB 12T4s показан на рис. 8. Обратите внимание на основные изменения в спецификации компонентов данного типа:

- В названии модуля указан номинальный ток кристалла (453) — параметр, определяемый производителем чипов. Предельный ток модуля при температурах 25/80 °C, значение которого нормировалось в прежней систе-

ме обозначений, существенно превышает эту величину (685/525 А).

- Пиковый ток IGBT I_{CRM} и антипараллельного диода I_{FRM} равен 3-кратному номинальному значению (ранее I_{CRM} = 2 × I_{Cnom}).
- Предельная рабочая температура кристаллов повышена до 175 °C.

Силовые ключи серии T4 будут производиться в полумостовой GB и чопперной конфигурации GAL/GAR с током от 50 до 700 А, в виде одиночных ключей GA — от 400 до 700 А, для 3-фазных инверторов GD диапазон рабочих токов составит 100–500 А. Инженерные образцы модулей SEMITRANS и SEMIX с кристаллами Trench 4 можно будет заказать с сентября 2007 года, а технические характеристики уже доступны на сайте компании www.semikron.com.

Литература

1. Annacker R., Herzer R. IGBT4 Technology Improves Application Performance. SEMIKRON International, 2007.
2. Колпаков А. NPT, Trench, SPT... Что дальше? // Силовая Электроника. 2006. №3
3. Annacker R., Hermwille M., Wahi A. 1200 V Modules with Optimised IGBT and Diode Chips // Elektronik Praxis., 02/2003.
4. Колпаков А. Антипараллельные диоды SK для новых поколений IGBT // Электронные компоненты. 2005. № 2.
5. Scheuermann U. Paralleling of Chips — From the Classical 'Worst case' Consideration to a Statistical Approach // PCIM 2005 (S4a3). 05/2005.
6. Freyberg M., Scheuermann U. Measuring Thermal Resistance Of Power Modules // PCIM 2003. 05/2003.