

Trench 4 —

универсальная технология IGBT. Руководство по эксплуатации

Использование новых типов кристаллов IGBT в стандартных конструктивах дает возможность увеличить техническую эффективность и мощностные характеристики силовых преобразовательных устройств без изменения их конструкции. В модулях семейств MiniSKiiP, SEMiX, SEMITRANS и SKiM, производимых компанией SEMIKRON начиная с 2007 года, применяются чипы нового поколения: Trench 4 IGBT от Infineon и антипараллельные диоды CAL 4 собственной разработки. Улучшенные технические характеристики силовых ключей серии T4 позволяют им с успехом заменить практически все используемые в настоящее время типы низковольтных IGBT. Основные особенности технологии Trench Field Stop были подробно рассмотрены в [1]. Предлагаемая статья посвящена вопросам применения компонентов четвертого поколения.

Арендт Винтрих
(Arendt Wintrich)

Arendt.Wintrich@semikron.com

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Введение

От каждого нового поколения силовых ключей пользователи ждут очередного снижения потерь и повышения плотности тока. Производители чипов стараются не только удовлетворить эти запросы, но и сократить размер кристаллов, снижая таким образом расход кремния и себестоимость продукции. На рис. 1 показано, как исторически шло уменьшение площади чипов IGBT, сопровождающееся соответствующим улучшением характеристик проводимости. С появлением четвертого поколения IGBT, выполненных по технологии Trench Field Stop, плотность тока повысилась с 85 А/см² (SPT IGBT) и 115 А/см² (T3 IGBT) до рекордного на данный момент показателя 130 А/см².

Размер чипов IGBT T4 рассчитан исходя из условия достижения оптимального соотношения между стоимостью, электрическими и тепловыми характе-

ристиками. Следует отметить, что неизбежная плата за уменьшение активной площади полупроводников — повышенное тепловое сопротивление и худшая стойкость к режиму короткого замыкания. Для преодоления проблем, связанных с повышением плотности мощности, необходимо снижать уровень потерь.

При переходе от второго к третьему поколению IGBT усилия производителей были направлены на уменьшение потерь проводимости (напряжения насыщения V_{CEsat}). Основной задачей, поставленной при разработке Trench 4 IGBT, стало улучшение динамических характеристик и обеспечение плавного характера переключения.

Кроме того, для повышения перегрузочной способности диапазона рабочих температур должен быть расширен до величины не менее $T_{jmax} = 175^\circ\text{C}$, такое требование выдвигается в первую очередь производителями транспортных приводов. Если учесть, что стандартным значением «теплового запаса» для пиковых перегрузок считается 25°C , то для кристаллов 4-го поколения номинальной долговременной рабочей температурой является 150°C . В пересчете на выходную мощность 3-фазного инвертора это означает прибавку не менее 20% по сравнению с модулями, у которых величина T_{jmax} ограничена на уровне 125°C .

Кристаллы IGBT⁴ созданы на основе Trench-технологии 3-его поколения, которая используется при производстве модулей SEMIKRON 066-й, 126-й и 176-й серий с рабочим напряжением 600, 1200 и 1700 В соответственно. Эти компоненты отличаются очень хорошими характеристиками проводимости: напряжение насыщения V_{CEsat} модулей 126-й серии при номинальном токе и температуре 25°C не превышает 1,7 В, для компонентов 066-й серии $V_{CEsat} = 1,45$ В. Однако уровень динамических потерь у них достаточно высок, и в режиме «жесткой коммутации» применение ключей данного типа на частотах выше 5–7 кГц нецелесообразно.

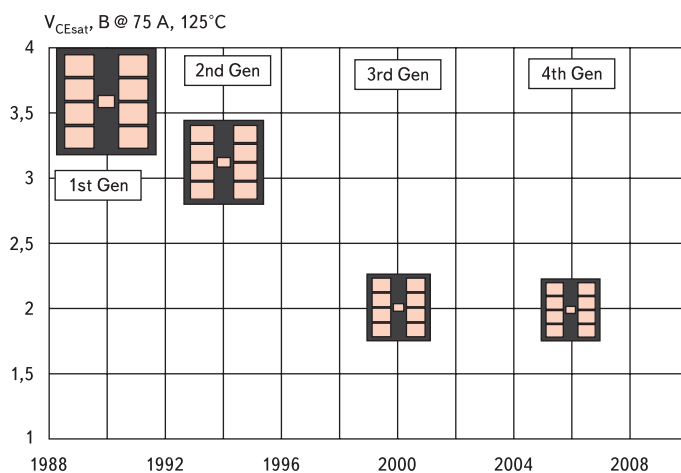


Рис. 1. Уменьшение размера кристаллов IGBT и напряжения насыщения V_{CEsat}

Таблица 1. Сравнительные характеристики IGBT различных поколений (рабочее напряжение 1200 В, номинальный ток кристалла — 100 А)

Параметр, единица измерения	SPT IGBT (серия 128)	Trench IGBT3 (серия 126)	Trench IGBT4 (серия 127A) / 150 °C
Напряжение насыщения V_{CEsat} , В (@ I_{Cnom} , 25 °C)	1,9	1,7	1,8
Напряжение насыщения V_{CEsat} , В (@ I_{Cnom} , 125 °C)	2,1	2,0	2,1/2,2
Энергия переключения E_{sw} , мДж (@ 125 °C)	22	27	19/21
Тепловое сопротивление $R_{th(j-c)}$, °C/Вт	0,17	0,22	0,27
Заряд затвора Q_G , мкКл (@ $V_{GE} = -8/+15$ В)	1,2	0,9	0,57
Температура кристалла T_{jmax} , °C	150	150	175

Существенное улучшение характеристик было достигнуто благодаря оптимизации основных элементов вертикальной структуры чипа: *n*-базы, *n*-Field Stop слоя, предназначенного для повышения напряжения пробоя, и эмиттера. В результате модернизации Trench-технологии удалось снизить суммарное значение потерь в широком диапазоне частот и обеспечить плавный характер переключения. Не менее важным достижением является увеличение допустимой рабочей температуры T_{jmax} кристаллов со 150 до 175 °C. Благодаря этому применение нового поколения модулей IGBT позволяет увеличить запас по перегрузке в динамических режимах и повысить надежность работы преобразователей.

В таблице 1 приведены основные характеристики IGBT различных типов, определяющие мощность потерь. Для корректности сопоставления значения параметров даны при температуре $T_j = 125$ °C, а для чипов четвертого поколения добавлены соответствующие величины для $T_j = 150$ °C.

Как было уже отмечено, IGBT новой генерации отличаются пониженным уровнем динамических потерь. Значение параметра E_{off} у силовых ключей серии T4 даже несколько меньше, чем у наиболее универсальных на данный момент модулей SPT, а по сравнению с Trench IGBT третьего поколения этот показатель улучшен на 30%. Причем это сравнение справедливо как для стандартных условий измерения

(125 °C), так и для новых (155 °C), оговоренных в спецификации.

В зависимости от температуры кристалла энергия потерь E_{sw} может быть рассчитана в соответствии с выражением, использующим линейный температурный коэффициент TC:

$$E_{sw}(T_j) = E_{sw}(150\text{ °C}) \times (1 - TC \times (150\text{ °C} - T_j)),$$

где $TC_I = 0,0034$ для IGBT, $TC_D = 0,006$ для антипараллельного диода.

На графиках (рис. 2а) показаны измеренные и расчетные значения E_{sw} для различных температур T_j .

Процессы, происходящие при выключении Trench IGBT и модулей других современных типов (SPT или NPT), заметно отличаются. Главное различие состоит в том, что время t_f и потери выключения E_{off} для компонентов, производимых по Trench-технологии, практически не зависят от величины сопротивления затвора R_G .

Очень важным показателем IGBT, характеризующим надежность работы ключа в динамических режимах, является нормированное время короткого замыкания t_{sc} — время, в течение которого модуль способен без повреждения проводить ток самоограничения, определяемый крутизной IGBT. До появления тонкопленочных технологий этот показатель обычно равнялся 10 мкс при комнатной температуре. Для современных силовых ключей значение t_{sc} пришлось сократить до 5–6 мкс из-за невозможности быстро рассеивать в тонком кристалле огромное количество энергии, выделяемой в режиме КЗ.

Существует несколько разновидностей состояния короткого замыкания, два из которых показаны на рис. 4:

- «полумягкий» режим (4а) — IGBT включается на КЗ нагрузку (отрезок кабеля с нормированной распределенной индуктивностью) при $T_j = 150$ °C, $V_{CC} = 900$ В, $V_{CE(max)} = 1160$ В, $I_{CM} = 1715$ А, $R_{G(off)} = 15$ Ом;
 - «жесткий» режим (4б) — оба IGBT-полумоста открываются одновременно при $T_j = 150$ °C, $V_{CC} = 900$ В, $V_{CE(max)} = 1136$ В, $I_{CM} = 1524$ А, $R_{G(off)} = 15$ Ом;
- где T_j — температура кристалла; V_{CC} — напряжение DC-шины; $V_{CE(max)}$ — максимальное напряжение на DC терминалах модуля; $I_{CM} = 1524$ А — ток отключения; $R_{G(off)} = 15$ Ом — сопротивление затвора при выключении.

При напряжении питания $V_{CC} = 600$ В безопасное отключение IGBT может происходить при номинальном значении резистора затвора. При повышении напряжения DC-шины необходимо обеспечить так называемый режим «плавного» выключения (STO — Soft Turn-Off, или SSD — Soft Shut-Down), то есть снизить скорость выключения. Это достигается с помощью увеличения номинала резистора затвора $R_{G(off)}$ или за счет использования специальной траектории изменения V_{GE} например введения промежуточной ступени управления $V_{G(off)}$ = 0.

Точное значение сопротивления затвора для режима SSD определяется экспериментально,

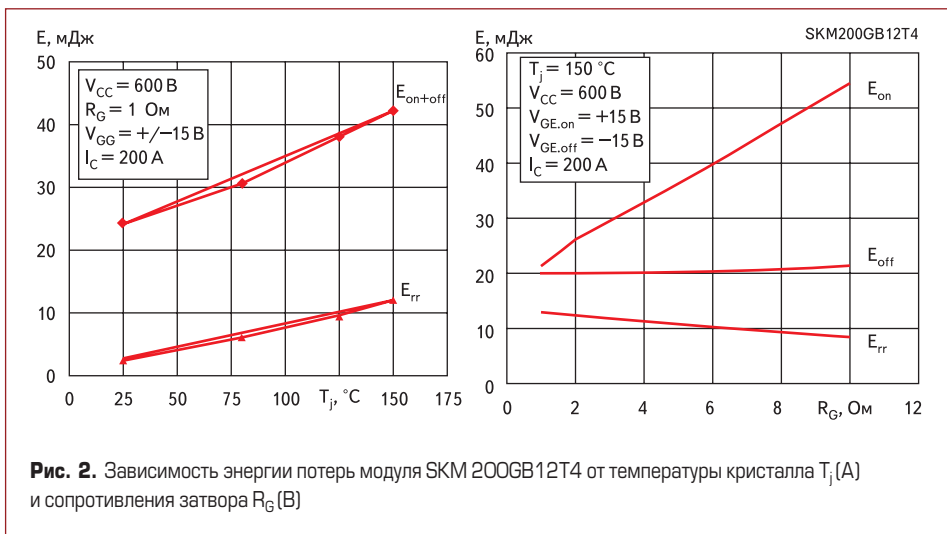


Рис. 2. Зависимость энергии потерь модуля SKM 200GB12T4 от температуры кристалла T_j (А) и сопротивления затвора R_G (В)

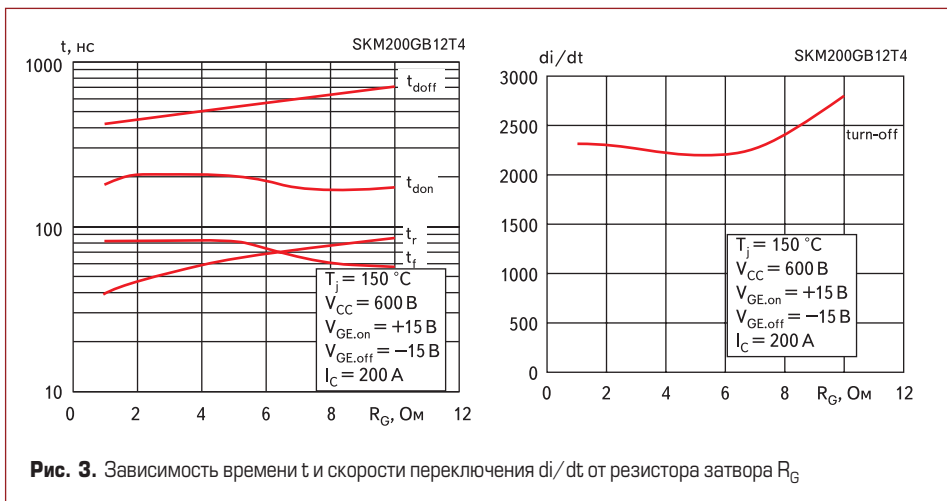


Рис. 3. Зависимость времени t и скорости переключения di/dt от резистора затвора R_G

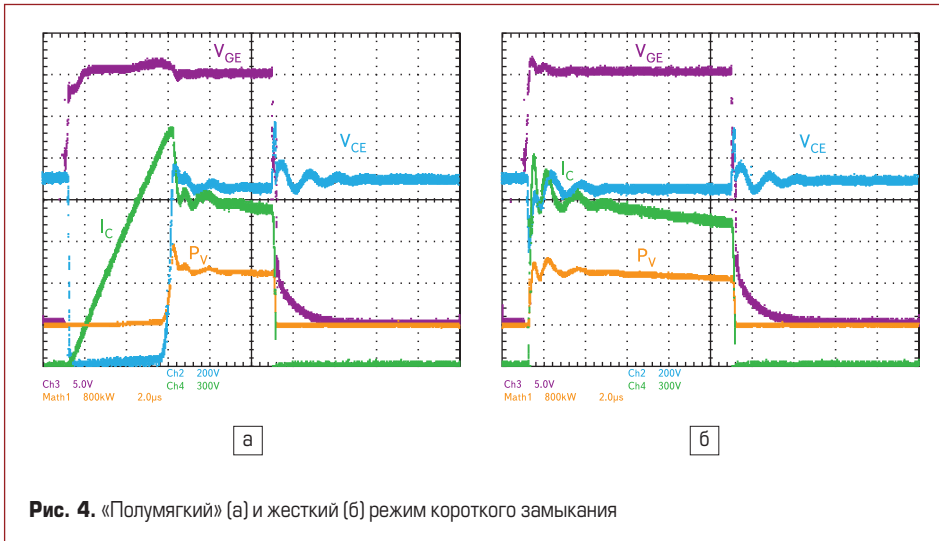


Рис. 4. «Полумягкий» (а) и жесткий (б) режим короткого замыкания

оно должно обеспечивать отсутствие опасных выбросов напряжения при отключении режима КЗ. Амплитуда этих перенапряжений зависит от скорости выключения и величины паразитной индуктивности цепи L_S . Как показано на рис. 4, уровень выбросов зависит также от типа КЗ. К выбору величины $R_{G(off)}$ надо относиться очень аккуратно, так как его неоправданное увеличение может привести к опасному росту потерь выключения.

Электромагнитная совместимость

Состав спектра электромагнитных помех инвертора завит в основном от градиентов тока $I_C(t)$ и напряжения $V_{CE}(t)$, образующихся при коммутации силовых ключей. Для современных полупроводниковых модулей средней мощности достижимы скорости изменения напряжения до 10 кВ/мкс и тока — до 10 кА/мкс (при комнатной температуре). С ростом температуры характер коммутации становится плавным, и указанные значения градиентов снижаются на 50–60%.

Скорость спада тока при выключении di/dt практически линейно зависит от I_C , а при возрастании напряжения DC-шины она увеличивается незначительно. Довольно неожиданным является тот факт, что di/dt для Trench 4 практически не спадает с ростом сопротивления затвора, как показано на рис. 36. В действительности в определенном диапазоне увеличение R_G даже несколько повышает скорость выключения тока, и только при больших величинах сопротивления di/dt снова начинает падать. Этот эффект вызван накоплением носителей заряда в базе транзистора в момент выключения: при малых значениях R_G электроны задерживаются в базовой области IGBT, большой накопленный заряд является причиной достаточно плавного наклона характеристики выключения. При увеличении резистора затвора, MOS-канал IGBT-структуры оказывается полностью закрытым в момент, когда ток начинает спадать. При этом электронов, которые могли бы создать дополнительный ток, уже нет, а оставшееся небольшое количество дырок быстро рассасывается, что приводит к увеличению скорости выключения. Данный процесс подробно описан в [3].

Коммутационные перенапряжения

Резкий спад тока коллектора, происходящий при выключении силового модуля, вызывает появление импульсных перенапряжений dV , наводимых на паразитных индуктивностях L_S коммутационных цепей: $dV = L_S \times di/dt$. Коммутационные пики добавляются к напряжению DC-шины, и образующийся в результате суммарный сигнал $V_{CE} = V_{DC} + dV$ может превысить напряжения пробоя IGBT. Необходимо также учесть, что предельное значение V_{CEmax} является характеристикой кристалла, а из-за наличия внутренней индуктивности выводов L_{CE} напряжение на чипах в импульс-

ных режимах всегда выше, чем на DC-терминалах модуля на величину $L_{CE} \times di/dt$. В зависимости от конструкции модулей и скорости выключения эта разница может достигать 100 В и более.

Измерения, проведенные на дополнительных сигнальных выводах коллектора и эмиттера (E_x, C_x), расположенных непосредственно рядом с чипом IGBT, показали, что наибольшее значение перенапряжения V_{CEmax} наблюдается на «холодном» кристалле (рис. 5а). При увеличении в некоторых пределах резистора затвора R_G возрастает как скорость выключения di/dt , так и амплитуда выбросов, как показано на рис. 5б. Ограничить уровень перенапряжения возможно только при достаточно больших значениях $R_{G(off)}$ (>20 Ом для модуля с номинальным током 300 А), что естественно ведет к заметному росту потерь выключения. При работе с большими уровнями напряжения DC-шины ($V_{DC} > 800$ В) между DC-терминалами модуля должен быть установлен снабберный конденсатор (рис. 5б). Кроме того, для предотвращения пробоя силового ключа в режиме КЗ в этом случае рекомендуется использование режима «плавного» отключения.

Внутренний резистор затвора R_{Gint}

Чтобы обеспечить синхронное управление кристаллами, соединенными в параллель внутри модуля, каждый из них должен иметь индивидуальный резистор затвора. Это необходимо для компенсации разброса напряжения

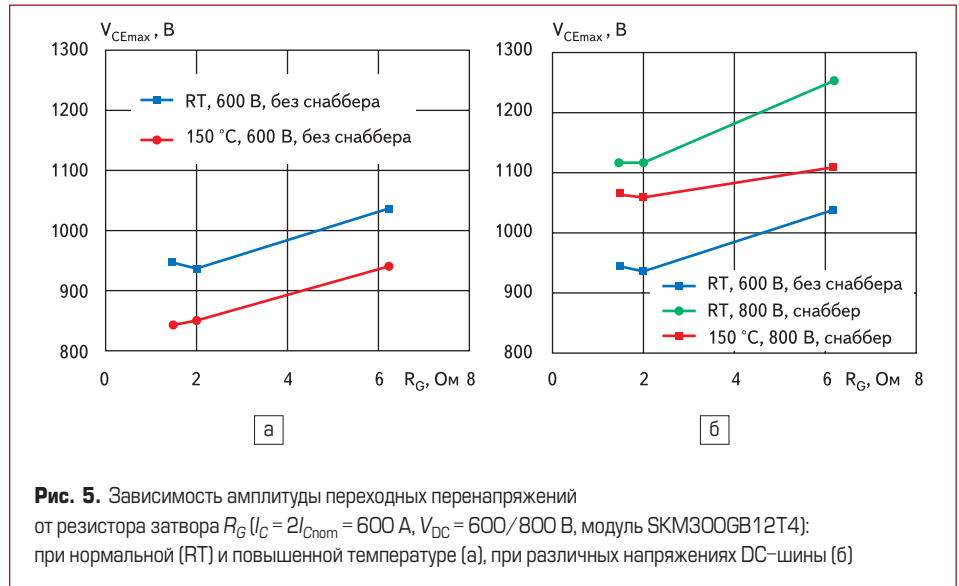


Рис. 5. Зависимость амплитуды переходных перенапряжений от резистора затвора R_G ($I_C = 2I_{Cnom} = 600$ А, $V_{DC} = 600/800$ В, модуль SKM300GB12T4): при нормальной (RT) и повышенной температуре (а), при различных напряжениях DC-шины (б)

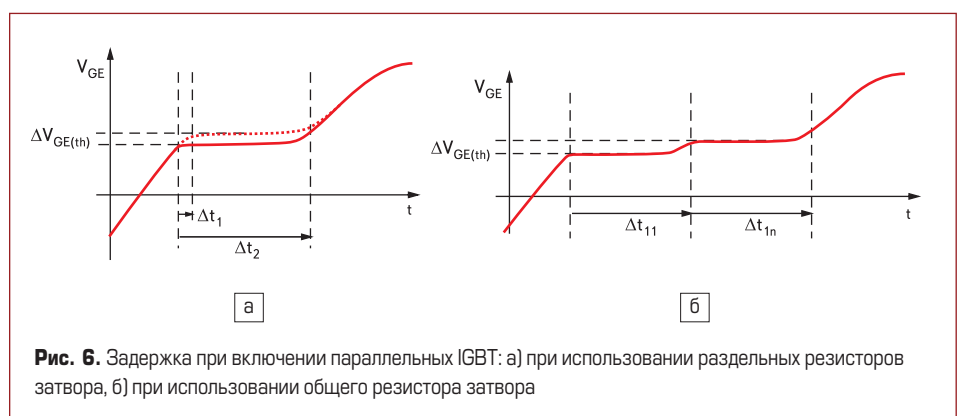


Рис. 6. Задержка при включении параллельных IGBT: а) при использовании отдельных резисторов затвора, б) при использовании общего резистора затвора

открывания $V_{GE(th)}$, на что следует обращать особое внимание при проектировании: пространственной ошибкой является непосредственное соединение затворов параллельных модулей. Разница в значении $\Delta V_{GE(th)}$ (рис. 6б) приводит к тому, что чип с минимальным $V_{GE(th)}$ откроется первым и примет на себя всю токовую нагрузку. Этот эффект усугубляется тем, что напряжение отпирания затвора имеет отрицательный температурный коэффициент. IGBT с большим пороговым напряжением откроется с задержкой Δt_{11} , определяемой временем включения модуля с меньшим $V_{GE(th)}$. Напомним, что длина горизонтального участка характеристики затвора зависит от значения емкости Миллера «коллектор – затвор» C_{cg} . Спадающее напряжение на коллекторе дифференцируется этой емкостью и создает ток, компенсирующий ток включения.

Существует простое и хорошо известное решение: все параллельно соединенные ключи должны иметь индивидуальные и одинаковые резисторы затвора. В этом случае напряжение на каждом затворе будет нарастать независимо и разница времени задержки включения не превысит Δt_1 , как показано на рис. 6а.

В зависимости от номинального тока кристалла I_{Cnom} SEMIKRON использует следующие номиналы затворных резисторов:

- $R_{Gint} = 10 \text{ Ом}$ ($I_{Cnom} = 75 \text{ А}$);
- $R_{Gint} = 7,5 \text{ Ом}$ ($I_{Cnom} = 100 \text{ А}$);
- $R_{Gint} = 5 \text{ Ом}$ ($I_{Cnom} = 75 \text{ А}$);
- $R_{Gint} = 2 \times 5 \text{ Ом}$ ($I_{Cnom} = 300 \text{ А}$; 2 чипа в параллель с $I_{Cnom} = 150 \text{ А}$);
- $R_{Gint} = 4 \times 7,5 \text{ Ом}$ ($I_{Cnom} = 400 \text{ А}$; 4 чипа в параллель с $I_{Cnom} = 100 \text{ А}$).

Отметим, что при нормировании динамических характеристик IGBT внутренний резистор затвора не включается в справочное значение R_G , под которым подразумевается только внешнее сопротивление. Тем не менее, величину R_{Gint} необходимо учитывать при расчетах нагрузочных параметров драйвера: предельного тока управления I_{GM} или минимального резистора затвора R_{Gmin} .

Антипараллельные диоды

Для того чтобы модернизированные кристаллы IGBT наиболее полно проявили свои преимущества, их необходимо использовать 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 четвертого поколения основное внимание уделялось обеспечению плавной кривой обратного восстановления di_r/dt и согласованию характеристик восстановления с динамическими свойствами Trench 4 IGBT. Усовершенствованная структура кристаллов позволила на 30% повысить допустимое значение плотности

тока, при этом потери переключения остались на уровне, достигнутом в диодах предыдущей генерации CAL3. Использование нового способа пассивации DLC (Diamond Like Carbon) дало возможность увеличить значение предельной рабочей температуры чипов до 175 °C и добиться наилучшего согласования параметров диодов CAL⁴ с характеристиками IGBT Trench 4.

Взаимозаменяемость

Для большинства применений замена модулей IGBT предыдущих серий на компоненты четвертого поколения дает очевидные преимущества: снижение уровня потерь, уменьшение коммутационных перенапряжений, улучшение электромагнитной совместимости. Существенно меньше оказывается потребляемая от драйвера мощность, так как величина заряда затвора Q_G для силовых ключей Trench 4 снижена более чем на 30%.

Однако для получения максимального эффекта от применения модулей новой генерации требуется некоторая адаптация схемы управления. В первую очередь рекомендуется изменить соответствующим образом резистор

затвора R_G . Если, например, SKM200GB12T4 установить вместо SKM200GB128D (SPT-IGBT), то величина R_G должна быть уменьшена с 7 до 1 Ом. Использование номинала, рекомендованного для SPT, приведет к увеличению потерь включения с $E_{on} (1 \text{ Ом}) = 21 \text{ мДж}$ до $E_{on} (7 \text{ Ом}) = 44 \text{ мДж}$ (рис. 2).

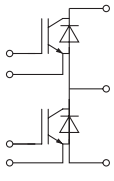
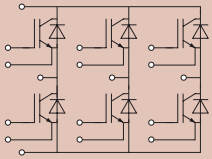
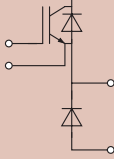
Информация, приведенная в таблицах 2 и 3, определяет в первом приближении соответствие компонентов серий 126, 128 и T4 в схеме 3-фазного инвертора с воздушным охлаждением при частоте переключений $f_{sw} = 4-8 \text{ кГц}$. Расчеты основаны на условии, что температура кристаллов T_j для всех видов ключей не превышает 125 °C, в то время как чипы IGBT Trench 4 рассчитаны на более высокую рабочую температуру ($T_{jnom} = 155 \text{ °C}$, $T_{jmax} = 175 \text{ °C}$). Это означает, что модули новой генерации обеспечивают в инверторных применениях соответствующий запас, как по номинальному току, так и по току перегрузки.

Сказанное подтверждается графиками, приведенными на рис. 7, где показана зависимость максимального выходного тока 3-фазного инвертора от частоты коммутации для трех типов IGBT: Trench 3 (SKM 400GB126D), SPT (SKM 400GB128D) и Trench 4 (SKM 300GB12T4).

Таблица 2. Соответствие модулей семейства SEMITRANS серий 126, 128, T4

Технология IGBT			Схема	Тип корпуса	
Trench 3 (126)	SPT (128)	Trench 4 (T4)			
		SKM50GB12T4			
	SKM75GB128D	SKM75GB12T4		2	
	SKM100GB128D	SKM100GB12T4		2	
SKM195GB126D	SKM145GB128D	SKM150GB12T4		2	
SKM200GB126D	SKM150GB128D	SKM150GB12T4		3	
SKM300GB126D	SKM200GB128D	SKM200GB12T4		3	
SKM400GB126D	SKM300GB128D	SKM300GB12T4		3	
SKM600GB126D	SKM400GB128D	SKM400GB12T4		3	
SKM195GAL126D	SKM145GAL128D				2
SKM200GAL126D	SKM145GAL128D				3
SKM400GAL126D	SKM300GAL128D		3		
SKM600GAL126D	SKM400GAL128D		3		
	SKM145GAR128D			3	
	SKM400GAR128D			2	
	SKM300GA128D	SKM300GA12T4		4	
SKM600GA126D	SKM400GA128D	SKM400GA12T4		4	
SKM800GA126D	SKM500GA128D	SKM600GA12T4		4	

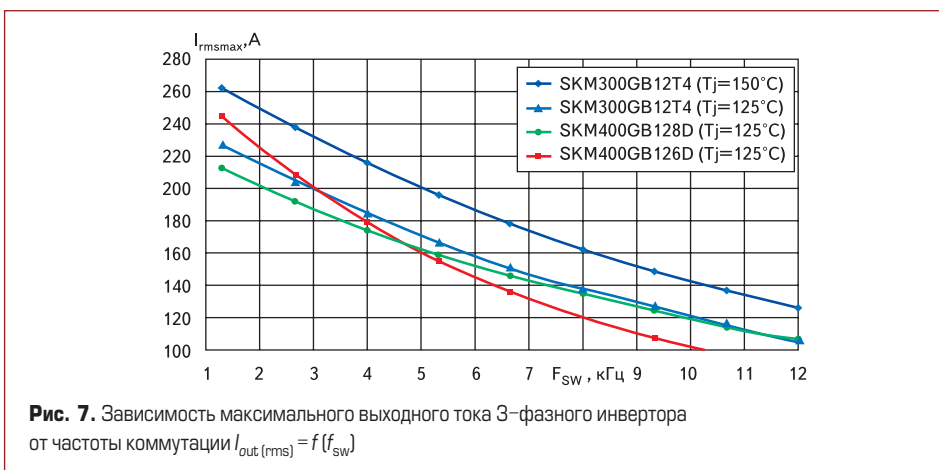
Таблица 3. Соответствие модулей семейства SEMiX серий 126, 128, T4

Технология IGBT			Схема	Тип корпуса
Trench 3 (126)	SPT (128)	Trench 4 (T4)		
		SEMIX151GB12T4s		
SEMIX252GB126HDs	SEMIX202GB128Ds	SEMIX202GB12T4s		2s
SEMIX302GB126HDs	SEMIX302GB128Ds	SEMIX202GB12T4s		2s
SEMIX452GB126HDs	SEMIX352GB128Ds	SEMIX302GB12T4s		3s
SEMIX353GB126HDs		SEMIX303GB12T4s		3s
SEMIX503GB126HDs	SEMIX403GB128Ds	SEMIX303GB12T4s		3s
SEMIX703GB126HDs	SEMIX553GB128Ds	SEMIX453GB12T4s		3s
SEMIX604GB126HDs		SEMIX404GB12T4s		4s
SEMIX904GB126HDs	SEMIX754GB128Ds	SEMIX604GB12T4s		4s
SEMIX101GD126HDs	SEMIX101GD128Ds	SEMIX71GD12T4s		13
SEMIX151GD126HDs	SEMIX151GD128Ds	SEMIX101GD12T4s		13
SEMIX251GD126HDs	SEMIX201GD128Ds	SEMIX151GD12T4s		13
SEMIX353GD126HDc		SEMIX303GD12T4c		33c
SEMIX503GD126HDc	SEMIX403GD128Dc	SEMIX303GD12T4c		33c
SEMIX703GD126HDc	SEMIX553GD128Dc	SEMIX453GD12T4c		33c
		SEMIX151GAL12T4s		1s
SEMIX452GAL126HDs	SEMIX352GAL128Ds	SEMIX302GAL12T4s		2s
SEMIX703GAL126HDs	SEMIX553GAL128Ds	SEMIX453GAL12T4s		3s
		SEMIX151GAR12T4s		1s
SEMIX452GAR126HDs	SEMIX352GAR128Ds	SEMIX302GAR12T4s		2s
SEMIX703GAR126HDs	SEMIX553GAR128Ds	SEMIX453GAR12T4s		3s

Расчеты выполнены для следующих условий эксплуатации:

- напряжение DC-шины $V_{cc} = 650$ В;
- выходное напряжение $V_{out} = 400$ В;
- частота выходного сигнала $f_{out} = 50$ Гц;
- температура окружающей среды $T_a = 40$ °С;
- тепловое сопротивление радиатора $R_{th(s-a)} = 0,031$ °С/Вт.

Эпоха для модулей нового поколения (SKM 300GB12T4) при $T_j = 125$ °С во всем диапазоне частот практически совпадает с кривой предельного тока для силовых ключей, выполненных по технологии SPT (SKM 400GB128D). Однако 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, что подтверждается соответствующим графиком на рис. 7.

Следует отметить, что замены, показанные в таблицах 2 и 3, справедливы не для всех применений и режимов эксплуатации. Предельный ток преобразователя зависит от ряда параметров, важнейшими из которых являются статические и динамические потери, а также их соотношение. Все эти показатели достаточно корректно можно определить только для конкретных условий применения. Однозначный ответ на вопрос, какой силовой ключ оптимален для заданных условий работы, может дать только тщательный тепловой расчет. Наиболее удобным и простым средством проведения анализа температурных режимов является программа теплового расчета Semisel, интерактивная версия которой доступна на сайте www.semikron.com.

Заключение

Над модернизацией и совершенствованием модулей IGBT в типовых конструктивах работают практически все фирмы-изготовители. В производственной программе SEMIKRON семейство стандартных модулей IGBT, включающее 5 типов корпусов, носит название SEMITRANS. К новым промышленным стандартам можно отнести и последнюю генерацию силовых ключей SEMiX, завоевавших большую популярность благодаря своим очевидным конструктивным достоинствам. Применение новейших поколений чипов IGBT в стандартных конструктивах дает возможность повышать эффективность и выходную мощность преобразователей без изменения их конструкции, поэтому их появление так приветствуется рынком.

Усовершенствованная технология Trench четвертого поколения позволяет расширить область рабочих частот, увеличить плотность мощности, обеспечить больший запас по перегрузкам. Для получения максимальной отдачи от использования четвертого поколения чипов IGBT компания SEMIKRON разработала новую серию антипараллельных диодов CAL 4, наилучшим образом согласованных с Trench 4 по температурным и динамическим параметрам. Компания постоянно работает над улучшением частотных и тепловых характеристик конструктивов модулей, снижая распределенное активное сопротивление и паразитную индуктивность терминалов.

Литература

1. Колпаков А. T4 — универсальная технология IGBT // Силовая электроника. 2007. № 3.
2. Annacker R., Herzer R. IGBT4 Technology Improves Application Performance. SEMIKRON International. 2007.
3. Hüsken H., Frank W. Balancing losses and noise considerations for choosing the gate resistor. PCIM 2006. Nuremberg.
4. Freyberg M., Scheuermann U. Measuring Thermal Resistance Of Power Modules. PCIM 05/2003, p. 34–38.