

Новые семейства IGBT 6-го поколения от International Rectifier

Александр САМАРИН
 asamarin@sait-ltd.ru
Максим СОЛОМАТИН
 solomatin@compel.ru

Компания International Rectifier является признанным лидером в разработке и производстве высококачественных силовых полупроводниковых приборов. Ассортимент продукции International Rectifier достаточно широк и объединяет в себе различные направления: мощные полевые транзисторы, биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) и модульные сборки на основе кристаллов транзисторов и диодов. IGBT-транзисторы — одно из ключевых направлений фирмы IR, и этим обуславливается постоянное совершенствование технологий изготовления и корпусирования IGBT-кристаллов. В результате появляются новые семейства транзисторов, оптимизированных под конкретный спектр применений. В статье рассматривается ряд новых семейств IGBT-транзисторов IR, изготовленных по технологии 6-го поколения (Gen6).

Традиционно IGBT используют там, где необходимо работать с высокими токами и напряжениями. Прогресс в IGBT-технологии шел по линии увеличения рабочих напряжений и токов, а также роста эффективности преобразования за счет снижения потерь мощности на кристалле, как в статическом, так и в динамическом режимах [1].

Компания International Rectifier выпускает широкую номенклатуру IGBT-транзисторов, для производства которых используются технологии 4-го (4PT IGBT), 5-го (5 Non-PT IGBT), 6-го (DS Trench IGBT) и 7-го (FS Trench IGBT)

поколений [2]. Для первых двух технологий в полевом транзисторе затвор выполняется по планарной технологии. В транзисторах 6-го поколения для снижения потерь проводимости и переключения использована технология формирования вертикального затвора (Trench-технология).

Вертикальная структура затвора позволила значительно уменьшить путь протекания тока. Емкость затвора полевого транзистора с вертикальным затвором меньше, чем у планарных транзисторов, поэтому для управления им потребуется меньшая мощность. Одновременно снижаются потери на пере-

ключение транзистора. Особенностью этой технологии стало применение тонких подложек: малая толщина структуры позволила улучшить тепловые характеристики прибора и расширить рабочий температурный диапазон кристалла. Транзисторы 6-го поколения способны работать при температуре перехода вплоть до +175 °С.

Уменьшение толщины кристалла способствовало и снижению его стоимости. Напряжение насыщения $V_{CE(on)}$ на 30% меньше по сравнению с аналогичным параметром для транзисторов 4-го и 5-го поколений, это приводит к снижению энергии рассеяния на кристалле, ослабляет его нагрев и повышает эффективность преобразования энергии.

Малая емкость затвора обеспечивает большее быстродействие управляющего MOSFET, при этом упрощается управление IGBT и снижается уровень динамических потерь. Незначительный остаточный ток (current tail) и малые потери выключения (E_{off}) позволяют разработчикам достичь более высоких значений КПД преобразователя.

Базовые параметры IGBT-транзисторов

Ключевыми параметрами IGBT-транзисторов, определяющими потенциал применения, являются их быстродействие, величина пробивного напряжения и рабочие токи. На рис. 1 показан потенциал применения IGBT-транзисторов (по таким параметрам, как быстродействие и пробивное напряжение) компании IR.

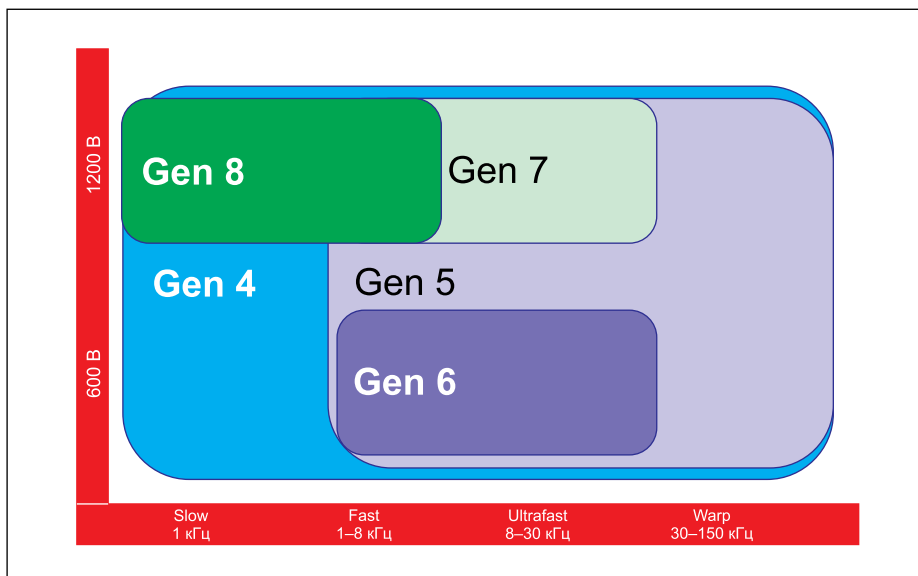


Рис. 1. Технологический потенциал различных поколений IGBT-транзисторов от IR

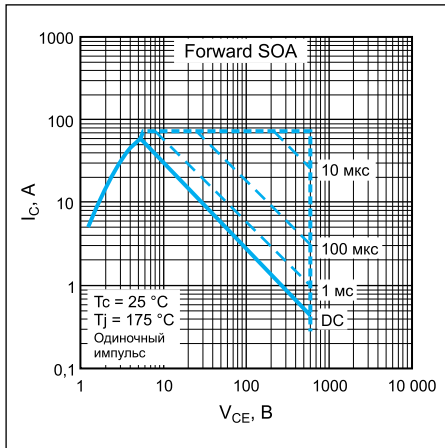


Рис. 2. Типовая FBSOA характеристика транзистора IRGP4640D

Все выпускаемые в настоящее время линейки транзисторов 6-го поколения IR по быстрдействию относятся к категории ultrafast, что соответствует диапазону рабочих частот от 8 до 30 кГц.

IGBT выпускаются в различных корпусных исполнениях: отдельные транзисторы (Single) и транзисторы со встроенными диодами (Co-Pack). Новые IGBT с антипараллельным ультрабыстрым диодом имеют более низкое напряжение насыщения коллектор-эмиттер $V_{CE(on)}$ и меньшую энергию переключения E_{ts} , чем транзисторы PT- и NPT-типа. Кроме того, ультрабыстрый диод с мягким восстановлением дополнительно повышает эффективность преобразования и снижает уровень генерируемых помех.

Зоны безопасной работы прибора (Safe Operating Area, SOA)

Эти характеристики задают поле допустимых значений токов и напряжений прибора и определяют надежность и безопасность работы транзистора во всех режимах. Они подразделяются на три области:

- область безопасности во включенном состоянии FBSOA (Forward Biased SOA);
- область безопасности в выключенном состоянии RBSOA (Reverse Biased SOA);
- область безопасности при коротком замыкании SC SOA (Short Circuit SOA).

Для правильного выбора IGBT следует рассматривать два ключевых момента. Оба они касаются поддержания IGBT в пределах максимальных регламентированных значений параметров в течение работы. Первым критерием является то, что амплитудное значение тока коллектора на промежутке выключения, включая условия перегрузки, должно быть в пределах SOA — области безопасной работы при переключении (то есть менее удвоенного номинального тока I_C). Вторым критерием является то, что рабочую температуру $p-n$ -перехода IGBT необходимо всег-

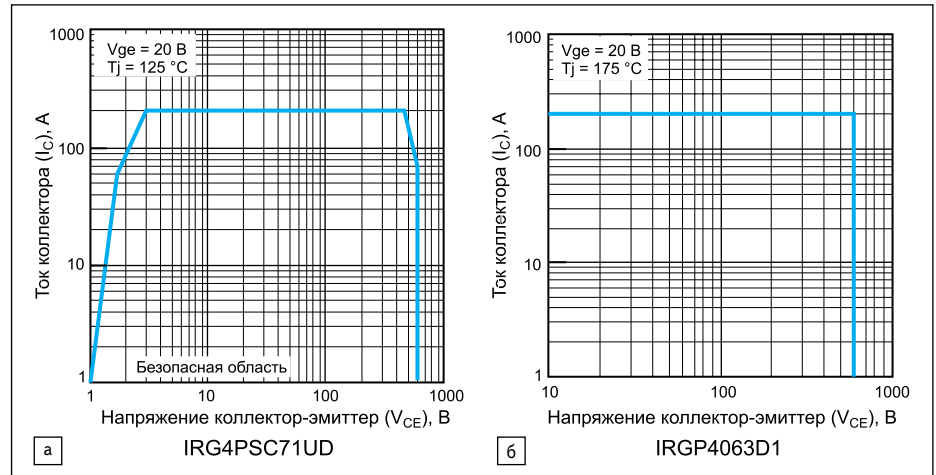


Рис. 3. Сравнительные характеристики зон RBSOA для IGBT: а) 4-го поколения; б) 6-го поколения

да поддерживать ниже уровня $T_{j(max)}$ во всех нормальных режимах работы, включая ожидаемую перегрузку.

Область FBSOA определяет допустимые значения тока и напряжения транзистора во включенном состоянии. У IGBT-транзисторов потери проводимости зависят от тока практически линейно:

$$P_{cond} = I_C \times V_{CE(on)} @ I_C,$$

где I_C — ток коллектора; $V_{CE(on)} @ I_C$ — напряжение насыщения транзистора (является функцией тока).

На рис. 2 показана типовая характеристика зоны FBSOA допустимых значений токов и напряжений для включенного состояния транзистора IRGP4640D.

Дополнительным преимуществом Trench-IGBT (в том числе и Gen6) является прямоугольная (square) область безопасной работы в режиме обратного смещения (RBSOA). На рис. 3 для сравнения приведены формы областей RBSOA для транзисторов 4-го (IRG4PSC71UDPBF) и 6-го (IRGP4063D1PBF) поколений, имеющих одинаковое значение максимального рабочего тока — 60 А при +100 °С.

Прямоугольная форма зоны RBSOA обеспечивает большую надежность прибора при работе с критическими токами и напряжениями. Новые транзисторы 6-го поколения имеют квадратную форму RBSOA вплоть до температуры кристалла +175 °С.

Параметр T_{SC} характеризует способность IGBT-транзистора кратковременно выдерживать режим короткого замыкания без возникновения необратимого лавинного пробоя полупроводниковой структуры. Для всех приборов 6-го поколения это время составляет 5 мкс. За это регламентированное время должна сработать внешняя схема токовой защиты, в задачи которой входит отключить нагрузку и уберечь ключевой транзистор и остальную часть устройства от протекания сверхтоков.

Новые серии IGBT-транзисторов Trench 6-го поколения компании IR

Компания разработала три серии транзисторов с диапазоном пробивных напряжений 600 и 650 В и рабочими токами коллектора от 4 до 200 А. Это серии IRGx40xx, IRGx46xxD и IRGx426x. Во всех типах транзисторов используются кристаллы толщиной 70 мкм. Гарантированное время работы в режиме короткого замыкания (SCSOA) — не менее 5 мкс для всех транзисторов упомянутых серий. Транзисторы обладают низкими значениями $V_{CE(on)}$ и положительным температурным коэффициентом, что облегчает их параллельное включение. Квадратная форма зоны работы при обратном смещении (BR SOA), высокая максимальная допустимая рабочая температура кристалла транзистора (+175 °С) и высокое значение максимального рабочего напряжения (600/650 В) обеспечивают семейству IGBT повышенную надежность в жестких условиях эксплуатации. Все корпусированные приборы выполнены по схеме Co-Pack (имеют встроенный антипараллельный ультрабыстрый диод). Рабочий температурный диапазон для всех транзисторов поколения Trench составляет -40...+175 °С.

Корпусирование и система обозначений транзисторов Gen6

Транзисторы 6-го поколения выпускаются в стандартизованных корпусах для SMD-монтажа (D2PAK) и сквозного монтажа (монтажа в отверстия) — TO-220, TO-247 (со стандартными и удлиненными выводами), а также Super TO-247 с улучшенной теплоотдачей. Удлиненные выводы могут быть полезны при специфическом размещении силовых компонентов в дизайне (невозможность установки радиатора непосредственно на плате, необходимость специфической формовки выводов и т. п.).

Корпус Super TO-247 (он же TO-274) имеет более низкое тепловое сопротивление

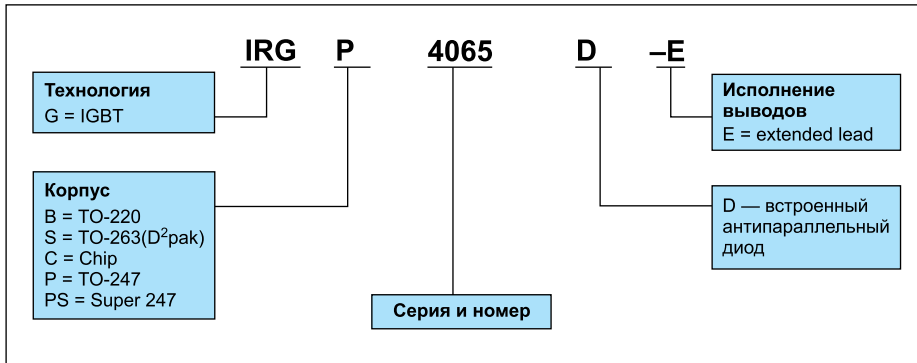


Рис. 4. Система обозначений транзисторов 6-го поколения

и лучше отводит тепло от кристалла и от самого корпуса. Корпус занимает такую же площадь, как стандартный TO-247, и одновременно обладает оптимальными тепловыми характеристиками и нагрузочной способностью более крупного корпуса TO-264. У Super TO-247 отсутствует крепежное отверстие, и для плотного контакта корпуса с радиатором используется монтажная клипса, которая прижимает транзистор и обеспечивает надежный тепловой контакт поверхности корпуса транзистора с поверхностью радиатора [3]. В корпусах Super TO-247 выпускаются транзисторы с рабочим током до 240 А (IRGPS4067DPBF).

На рис. 4 приведена система обозначений, используемая для обозначения IGBT-транзисторов 6-го поколения компании IR.

Технические характеристики

Серия IRGx40xx

Эта серия в семействе IGBT Gen6 была разработана первой и стала базовой. В ее состав входят приборы, обеспечивающие рабочий ток от 16 до 240 А. Приборы этой серии имеют встроенный антипараллельный диод. Транзисторы IRGx40xx выпускаются

Таблица 1. Основные параметры IGBT-транзисторов серии IRGx40xx

Наименование*	I _C , А		V _{CE(оп)} , В	E _{топ} , мДж	Падение на диоде V _D , В	SCSOA t _{зд} , мкс	Корпус
	при +25 °С	при +100 °С					
IRGB4060D	16	8	1,55	0,22	1,8	5	TO-220
IRG(S,B)4064D	20	10	1,6	0,23	2,5	5	D2-PAK TO-220
IRGB4061D	36	18	1,65	0,45	2,3	5	TO-220
IRGP4062-E	48	24	1,6	0,72	—	5	TO-247AD
IRG(S,B,P)4062D	48	24	1,6	0,72	1,8	5	D2-PAK TO-220 TO-247**
IRGP4063	96	48	1,65	1,9	—	5	TO-247**
IRGP4063D	96	48	1,65	1,9	1,95	5	TO-247**
IRGP4068	96	48	1,65	—	0,96	5	TO-247**
IRGP4063D1	96	48	1,65	1,9	2	5	TO-247**
IRGP4069	76	50	1,6	1,02	—	5	TO-247
IRGP4069D	76	50	1,6	1,02	2,2	5	TO-247**
IRGP4066	140	90	1,7	4,62	—	5	TO-247**
IRGP4066D	140	90	1,7	4,62	2,23	5	TO-247**
IRGPS4067D	240	160	1,7	9,18	2,4	5	TO-274

во всем наборе корпусов, описанных выше. Самый мощный представитель серии — IRGPS4067D — обеспечивает ток до 160 А при температуре корпуса +100 °С.

В таблице 1 приведены основные характеристики транзисторов этой серии.

Примечания к таблицам. * Все IGBT имеют постфикс “PBF” (бессвинцовое исполнение). ** IGBT выпускаются также в корпусе TO-247 с удлиненными выводами — TO-247AD (постфикс “-E” в наименовании).

Серия IRGx46xx

При разработке и производстве этой серии IGBT была использована усовершенствованная технология изготовления кристаллов, что позволило уменьшить размеры кристалла без заметного ухудшения его рабочих характеристик. Так как площадь кристалла уменьшилась по сравнению с «классическим» решением, то транзистор стал дешевле в производстве, в связи с тем, что в едином технологическом цикле изготавливается больше кристаллов. Разница в цене по сравнению с аналогичными по параметрам представителями семейства IRGx40xx может достигать от 5 до 20% в зависимости от конкретного компонента.

Основные характеристики транзисторов серии IRGx46xxD приведены в таблице 2.

Таблица 2. Основные параметры IGBT-транзисторов серии IRGx46xxD

Наименование*	I _C , А		V _{CE(оп)} , В	E _{топ} , мДж	Падение на диоде V _D , В	SCSOA t _{зд} , мкс	Корпус
	при +25 °С	при +100 °С					
IRG(R,S,B)4607D	11	7	1,75	0,11	1,7	5	D-PAK D2-PAK TO-220
IRG(R,S,B)4610D	16	10	1,7	0,18	1,6	5	D-PAK D2-PAK TO-220
IRG(S,B)4615D	23	15	1,55	0,22	1,8	5	D2-PAK TO-220
IRG(S,B,P)4620D	32	20	1,55	0,3	2,1	5	D2-PAK TO-247**
IRG(S,B,P)4630D	47	30	1,65	0,45	2,1	5	D2-PAK TO-220 TO-247**
IRGP4640D	65	40	1,6	0,72	1,8	5	TO-247**
IRGP4650D	76	50	1,6	1,02	2,2	5	TO-247**
IRGP4660D	96	60	1,65	1,90	1,95	5	TO-247**

Для приборов этой серии используется другая система обозначений, отличная от классической системы обозначений IGBT Gen6, описанной выше. Первые две цифры (46) обозначают номер серии, а две или три последующие цифры — значение рабочего тока транзистора при температуре корпуса +100 °С. Например, для транзистора IRGx4660 коллекторный ток составляет 60 А. Эта система обозначений более удобна для выбора транзистора.

Серия IRGP426x

Транзисторы этой серии имеют повышенное рабочее напряжение 650 В, что дает дополнительный запас прочности для систем, работающих в условиях питающего напряжения с высоким уровнем пульсаций. IGBT обеспечивают работу на частоте от 8 до 30 кГц (спецификация ultrafast) при гарантированной длительности безопасной работы в режиме K3 (SCSOA) не менее 5 мкс.

Транзисторы предназначены для применения в инверторных схемах систем бесперебойного питания, в системах электропривода и сварочных аппаратах. Эти модели выпускаются со встроенным обратным диодом (Co-Pack), а также в дискретном исполнении. Для обеспечения высокого рабочего тока (до 90 А при температуре корпуса +100 °С) и низкого температурного сопротивления кристалл-корпус транзисторы выпускаются в корпусах TO-247 со стандартными или удлиненными выводами.

В таблице 3 приведены основные параметры моделей этой серии.

Таблица 3. Основные параметры IGBT-транзисторов семейства IRGP426x

Наименование*	I _C , А		V _{CE(оп)} , В	E _{топ} , мДж	Падение на диоде V _D , В	SCSOA t _{зд} , мкс	Корпус
	при +25 °С	при +100 °С					
IRGP4262D	65	40	1,7	0,72	1,6	5	TO-247**
IRGP4263	96	60	1,7	1,90	—	5	TO-247**
IRGP4263D	96	60	1,7	1,90	1,9	5	TO-247**
IRGP4266	140	90	1,7	4,62	—	5	TO-247**
IRGP4266D	140	90	1,7	4,62	2,1	5	TO-247**

Области применения IGBT-транзисторов 6-го поколения

Новые серии IGBT Gen6 подходят для применения в составе корректоров коэффициента мощности (ККМ), выходных полумостов преобразователей энергии различного назначения и зарядных устройств. Подобные схемы являются частью систем бесперебойного электропитания (UPS), систем электропривода промышленного и потребительского сегментов, а также промышленных систем общего назначения.

Приборы серии IRGx46xx позволяют понизить себестоимость изделий и систем, а также на 30% снизить мощность

рассеивания по сравнению с IGBT других типов. Транзисторы серии IGBP426x, имеющие большее напряжение пробоя, целесообразно применять в ответственных приложениях, критичных к выбросам напряжения питания.

Заключение

Применение IGBT-транзисторов 6-го поколения Trench позволяет снизить потери на переключение и проводимость, что обеспечивает более высокий КПД преобразования энергии и высокую выходную плотность мощности, особенно при использовании серии IRGx40xx. Приборы серии IRGx46xxD позволяют снизить себестоимость конечных изделий при сохранении их технических характеристик. А транзисторы серии IGBx426x, имеющие большее напряжение пробоя

(650 В), целесообразно применять в ответственных приложениях и устройствах, работающих в условиях нестабильного напряжения питания с высоким уровнем помех. ■

Литература

1. Автушенко К., Гавриков В. WARP-speed IGBT — достойная альтернатива высоковольтным MOSFET в мощных DC/DC-преобразователях с частотой до 150 кГц // Компоненты и технологии. 2014. № 3.
2. Донцов А. Мощные и эффективные IGBT седьмого поколения от IR // Силовая электроника. 2013. № 5.
3. Автушенко К., Голубцов М. Семейство MOSFET с ультранизким $R_{DS(on)}$ в корпусе TO-247 компании International Rectifier // Компоненты и технологии. 2013. № 4.