

WARP-speed IGBT — достоинная альтернатива высоковольтным MOSFET в мощных DC/DC-преобразователях с частотой до 150 кГц

Кирилл АВТУШЕНКО
Вячеслав ГАВРИКОВ

Сверхбыстродействующие WARP-speed IGBT-транзисторы компании International Rectifier хорошо знакомы разработчикам силовой электроники. Они разрабатывались в качестве альтернативы MOSFET в приложениях с рабочей частотой до 150 кГц. Примером таких приложений являются импульсные DC/DC-источники питания (ИП). Цель статьи — анализ перспективности использования WARP-speed IGBT с учетом обобщенных теоретических и практических данных.

Введение

С момента появления на IGBT (БТИЗ) возлагались большие надежды как на более дешевую альтернативу силовым MOSFET-транзисторам в диапазоне напряжений 400–600 В. Однако долгое время эти ожидания не оправдывались из-за нескольких недостатков IGBT. Во-первых, они были недостаточно быстры для некоторых приложений. А во-вторых, цена выпускаемых IGBT оказывалась выше, чем у постоянно дешевеющих MOSFET.

В результате расстановка сил долгое время оставалась следующей [1] (рис. 1): высоковольтная и низкочастотная области применения оставались за IGBT, низковольтная и высокочастотная — за MOSFET. Такое распределение «обязанностей» объяснялось просто [2].

IGBT могут работать при значительных напряжениях — более 1200 В, в то время как производство MOSFET на подобные напряжения связано с практически непреодолимыми трудностями.

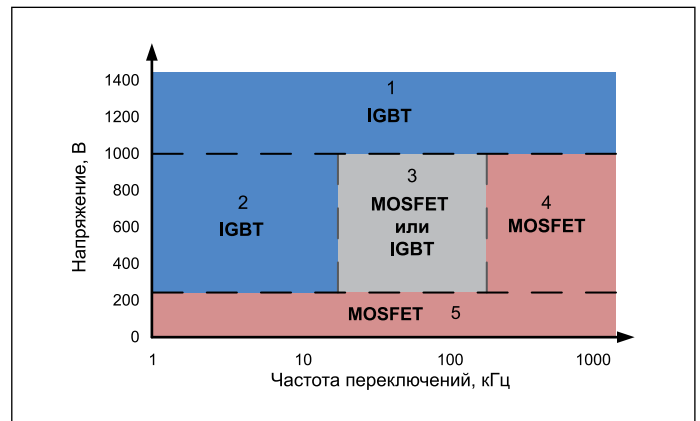


Рис. 1. Области применения силовых транзисторов

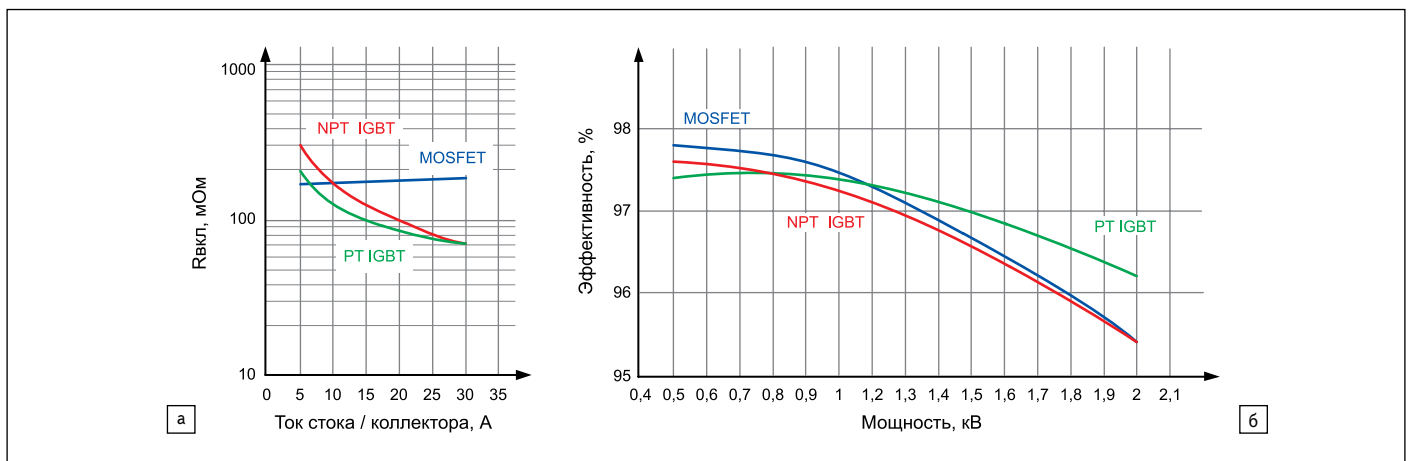


Рис. 2. Графики основных электрических зависимостей для IGBT и MOSFET

Кроме того, IGBT позволяют достигать большей плотности тока и меньшего эквивалентного сопротивления (рис. 2а). Высокая плотность тока позволяет сократить размер кристалла IGBT более чем в два раза по сравнению с MOSFET. Уменьшение кристалла приводит и к удешевлению прибора. В низкочастотной области со средними значениями напряжения (рис. 1, область 2) чаще применяют IGBT.

С увеличением частоты потери мощности в IGBT возрастают. Поэтому на высоких частотах преимуществом обладают MOSFET (рис. 1, область 4). Цена низковольтных MOSFET (до 200 В) низка и продолжает снижаться, что не позволяет IGBT конкурировать с MOSFET в низковольтных приложениях (рис. 1, область 5).

Однако остается область средних частот и средних напряжений (рис. 1, область 3), в которой выбор между MOSFET и IGBT не всегда очевиден.

С учетом вышесказанного можно определить области применения типовых IGBT: управление двигателями с частотой до 20 кГц, низкочастотные источники питания с постоянной нагрузкой, сварочные аппараты.

Использование IGBT в импульсных DC/DC-источниках питания (SMPS) долгое время не всегда было оправданно. С появлением WARP-speed IGBT, которые способны работать на частоте до 150 кГц, появилась возможность применять IGBT и в более скоростных схемах. Чтобы понять, за счет чего можно добиться увеличения частотного диапазона, необходимо рассмотреть особенности реализации на примере IGBT от International Rectifier.

Способы увеличения рабочей частоты IGBT

Рассмотрим базовую ячейку IGBT и ее основные недостатки. Простейшая структура IGBT выполнялась на пластине p^+ -типа (рис. 3а). При подаче положительного напряжения на затвор в p^+ -базе появляется проводящий канал. Между коллектором и эмит-

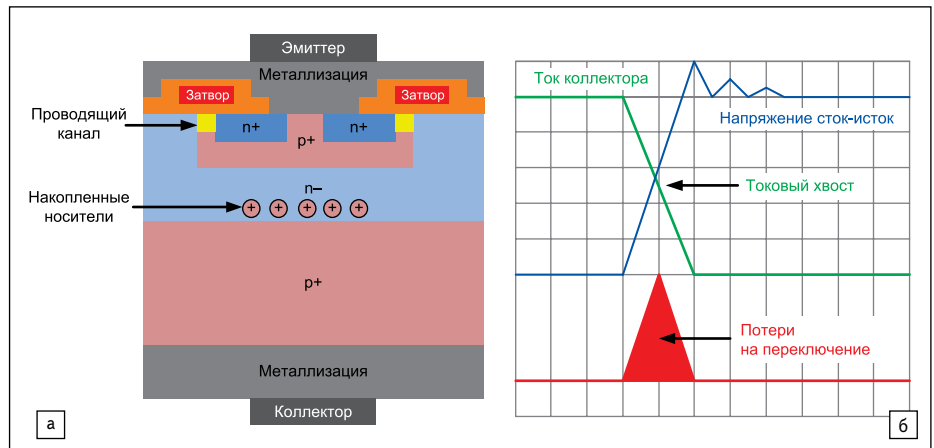


Рис. 3. Простейшая ячейка IGBT и ее характеристика выключения

тером начинает протекать ток. Так как коллектор находится под действием внешнего положительного напряжения, то происходит инжекция дырок в n -область.

Если снять напряжение с затвора, проводящий канал в p -базе исчезает, но ток некоторое время продолжает протекать. Причина этого в том, что дырки, накопленные в n -области, исчезают только за счет естественной рекомбинации, а это весьма долгий процесс.

Протекающий ток называют «токовым хвостом» (current tail). Он является причиной повышенной выделяемой мощности при переключениях (рис. 3б). Потери на переключения являются основными для IGBT. Для сравнения рассмотрим DC/DC-преобразователь [2]. Для него характерны токи трапецеидальной формы, и, как следствие, большие протекающие токи даже в случае выключенного ключа. В таких условиях, при частоте 80–100 кГц, 70% потерь мощности для MOSFET приходится на потери за счет собственного сопротивления открытого канала (потери проводимости), в то время как для IGBT 70% потерь приходится на потери на переключение.

Существует несколько способов ускорения процесса рекомбинации носителей после выключения [3, 4] (рис. 4).

Наибольшая концентрация дырок располагается в n -слое вблизи границы с p^+ -слоем. Если на этой границе дополнительно поместить высоколегированный n^+ -слой, то рекомбинация дырок произойдет быстрее (рис. 4а). Такая структура называется планарной эпитаксиальной, или РТ-структурой (punch through). По такой технологии производились IGBT четвертого поколения.

Толщина кристалла в типовой РТ-структуре составляет несколько сотен микрометров [5]. Она, в основном, определяется толщиной высоколегированной p^+ -пластины. Если в качестве основы использовать тонкие слаболегированные n -пластины (менее 100 мкм), а слой коллектора p^+ создавать дополнительно, то суммарная толщина изменится (рис. 4б). Это позволит снизить степень легирования p^+ -области коллектора и уменьшить накапливаемый заряд. Такая структура называется планарной гомогенной (Non Punch Through, NPT). Частотные свойства таких структур заметно лучше, чем у базового варианта. По такой технологии производились IGBT пятого поколения.

NPT-структуру можно улучшить по аналогии с созданием РТ. Для этого, как и в РТ-структуре, необходимо создать дополнительный высоколегированный n^+ -слой (рис. 4в).

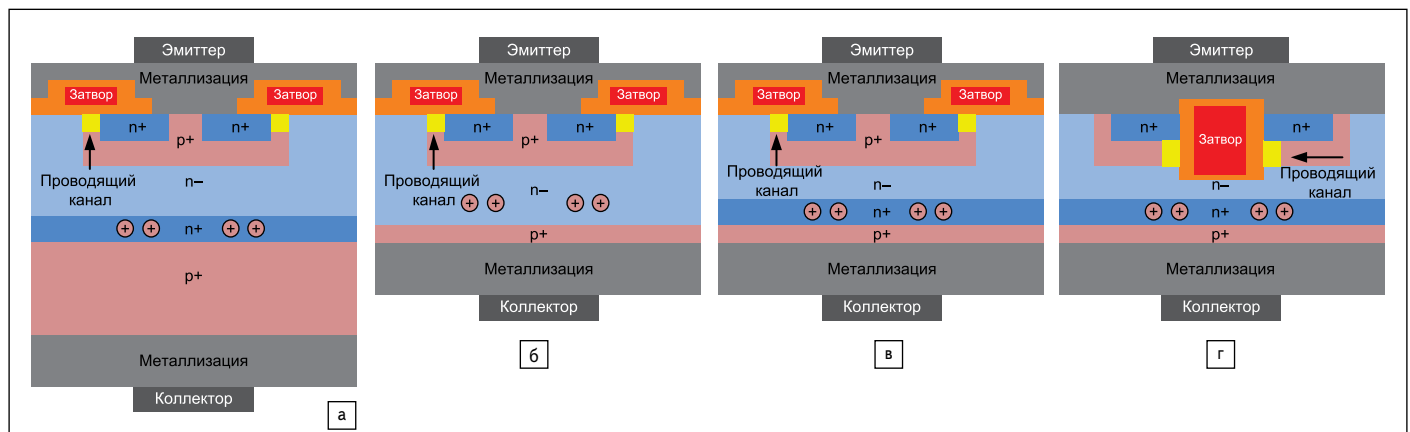


Рис. 4. Эволюция IGBT

Скорость рекомбинации вырастет. Такую структуру называют FIELD STOP из-за особой формы напряженности поля в структуре кристалла.

Все перечисленные структуры назывались планарными из-за планарного расположения затвора. В новых поколениях затвор располагают в специальной канавке (рис. 4г). Это позволяет дополнительно уменьшить путь тока, так как в этом случае ток течет вертикально. Эффективная толщина *n*-слоя уменьшается, и степень легирования также можно снизить, если требуется получить высокую рабочую частоту.

WARP-транзисторы являются наиболее быстрыми IGBT от International Rectifier. Они изготавливаются как в виде PT, так и NPT-структур, и имеют широкий частотный диапазон. Рабочая частота WARP-speed IGBT превосходит аналогичный параметр у U-серии (Ultrafast) в два раза. Сравнение с U-серией дает интересные результаты [2] (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение параметров Ultrafast- и WARP-IGBT

Параметр	Ultrafast	WARP	Разница
$V_{КЭ\text{нас.}}$, В	1,7	2,1	+24%
$E_{\text{вкл.}}$ мкДж	1360	800	-41%
$E_{\text{выкл.}}$ мкДж	1100	550	-50%

WARP-IGBT имеют большее напряжение насыщения: 2,1 В против 1,7 В у U-серии. Это приводит к росту потерь проводимости примерно на 24%. Однако энергия на включение сократилась на 41%, и что более важно — энергия на выключение сократилась на 50%. Чтобы ответить на вопрос, достаточно ли этого для замещения MOSFET в импульсных источниках, необходимо оценить уровень потерь.

Методы расчета потерь в IGBT и MOSFET

Как было сказано выше, основной вклад в потери для MOSFET вносят потери проводимости, а для IGBT — потери на переключение. Методика расчета учитывает оба типа потерь и позволяет рассчитать температуру кристалла (табл. 2).

Таблица 2. Методика расчета мощности потерь

Параметр	MOSFET	IGBT
Потери проводимости	$P_{\text{cond}} = I_{D(\text{rms})}^2 \times R_{DS(\text{on})} \times D$, где D — коэффициент заполнения	$P_{\text{cond}} = V_{CE(\text{on})} \times I_C \times D$, где D — коэффициент заполнения
Потери на переключение	$P_{\text{sw}} = I_D \times V_{DS} \times t \times f$, где f — частота переключений; t — суммарное время переключения (on + off)	$P_{\text{sw}} = E_{\text{TS}} \times f$, где f — частота переключений; E_{TS} — суммарные потери на переключения (приводится в параметрах IGBT)
Суммарные потери	$P_D = P_{\text{cond}} + P_{\text{sw}}$	
Температура кристалла	$T_J = P_D \times R_{\text{thJC}} + T_C$, где T_C — температура корпуса; T_J — температура кристалла; R_{thJC} — тепловое сопротивление кристалл-корпус (приводится в параметрах IGBT/MOSFET)	

Таблица 3. WARP-speed IGBT от International Rectifier

Наименование	Встроенный диод	V_{CE} (max), В	I_C , А		$V_{CE(\text{on})}$, В		Тип структуры	E_{TS} , мДж		Напряжение диода (V) тип., В	Корпус
			при +25 °С	при +100 °С	тип.	max		тип.	max		
IRGB20B60PD1	Есть	600	40	22	2,5	2,8	NPT	0,2	0,29	1,5	TO-220
IRGP20B60PD			40	22	2,5	2,8		0,2	0,29	1,4	TO-247
IRGP35B60PD			60	34	2,25	2,55		0,44	0,54	1,3	TO-247
IRGP50B60PD			75	42	2	2,2		0,74	0,96	1,5	TO-247
IRGP50B60PD1			75	45	2	2,35		0,63	0,75	1,3	TO-247
IRG4PF50WD	Нет	900	51	28	2,25	2,7	PT	3,97	5,3	2,5	TO-247
IRG4BC20W-S		13	7	2,16	2,6	0,14		0,2	—	D2-PAK	
IRG4BC30W-S		23	12	2,1	2,7	0,26		0,35	—	D2-PAK	
IRG4BC40W-S		40	20	2,05	2,5	0,34		0,45	—	D2-PAK	
IRG4BC20W		13	7	2,16	2,6	0,14		0,2	—	TO-220	
IRG4BC30W		23	12	2,1	2,7	0,26		0,35	—	TO-220	
IRG4BC40W		40	20	2,05	2,5	0,34		0,45	—	TO-220	
IRG4IBC20W		12	6	2,16	2,6	0,14		0,2	—	TO-220FP	
IRG4IBC30W		17	8	2,1	2,7	0,26		0,35	—	TO-220FP	
IRG4PC30W		23	12	2,1	2,7	0,26		0,35	—	TO-247	
IRG4PC40W		40	20	2,05	2,5	0,34		0,45	—	TO-247	
IRG4PC50W		55	27	1,93	2,3	0,4		0,5	—	TO-247	
IRG4BC40W-L		40	20	2,05	2,5	0,34		0,45	—	TO-247	
IRG4PF50W		900	51	28	2,25	2,7		1,25	1,7	—	TO-247

Используя расчетные формулы (табл. 2), можно сравнить потери в IGBT и MOSFET. Сделаем это на примере понижающего преобразователя мощностью 250 Вт с рабочей частотой 100 кГц. Максимальное коммутируемое напряжение составляет 384 В. В качестве сравнимых ключевых элементов нами были выбраны:

- IGBT — IRG4BC30W — $V_{CE\text{max}} = 600$ В, $V_{CE(\text{on})} = 2,1$ В, $I_C = 12$ А при +100 °С (TO-220);
- MOSFET — $V_{D\text{max}} = 500$ В, $R_{DS(\text{on})} = 0,4$ Ом, $I_D = 14$ А (TO-247).

Расчетные значения потерь проводимости составят 4,54 Вт (MOSFET) и 4,66 Вт (IGBT). Потери на переключение будут равны 10,9 Вт (MOSFET) и 11,2 Вт (IGBT).

Таким образом, суммарные потери для MOSFET и IGBT составят соответственно 15,44 и 15,86 Вт. То есть разница практически отсутствует. Однако стоит помнить, что отвод тепла для TO-220 и TO-247 отличается. Перегрев IGBT будет больше. Температура перехода для IGBT будет примерно равна +93 °С, в то время как для MOSFET она будет равна всего +74 °С. Следует отметить, что в данном примере температура кристалла IGBT будет несколько выше, чем у MOSFET, за счет того, что площадь кристалла планарного MOSFET в 2 раза больше площади кристалла IGBT, что обеспечивает более низкое значение теплового сопротивления кристалл-корпус. Однако стоимость такого MOSFET будет также выше, чем стоимость IGBT, а «запас прочности» IGBT по температуре составит +57 °С, что более чем достаточно для обеспечения бесперебойной работы устройства.

В данном примере найдена точка «равновесия». Действительно, если увеличивать частоту переключений, то потери IGBT значительно возрастут и MOSFET станет более предпочтительным. С другой стороны, если

увеличить значение выходного тока, то преимущество будет при наличии IGBT.

Необходимо четко понимать, что WARP-транзисторы позволяют расширить область применения IGBT, но они не способны заменить MOSFET везде. Для каждого приложения необходимо грамотно взвешивать все «за» и «против». Если при выборе важную роль играет цена, то выбор может быть сделан пользу WARP-speed IGBT от International Rectifier.

WARP-speed IGBT от International Rectifier

WARP-speed IGBT от International Rectifier способны работать на частоте до 150 кГц, в том числе в составе импульсных ИП. При этом они сохраняют вполне привлекательную цену. При производстве WARP-IGBT используют как PT-, так и NPT-тип структур (табл. 3).

NPT-транзисторы оснащаются дополнительным кристаллом обратного диода, который разваривается совместно с кристаллом самого IGBT и корпусируется вместе с транзистором. WARP-транзисторы такого типа предназначены для работы с напряжением до 600 В и током до 75 А.

IGBT с PT-структурой выпускаются на два типа напряжений — 600 и 900 В. В силу конструктивных особенностей, которые были рассмотрены ранее, рабочий ток этих транзисторов несколько ниже — до 51 А.

Заключение

WARP-speed IGBT от International Rectifier способны работать на частоте до 150 кГц, сохраняя при этом хорошие статические характеристики и низкую стоимость. В ряде случаев WARP-транзисторы имеют потери, сопоставимые с потерями MOSFET, но обладают при этом более низкой стоимостью.

Это делает возможным их применение, в том числе и в тех приложениях, в которых ранее использовались только MOSFET. Так, например, WARP-speed IGBT могут успешно применяться в схемах высокочастотных импульсных DC/DC-источников питания и схемах корректоров коэффициента мощности. ■

Литература

1. Blake C., Bull C. IGBT or MOSFET: Choose Wisely. International Rectifier.

2. Ambarian C., Chao C. WARP Speed™ IGBTs — Fast Enough To Replace Power MOSFETs in Switching Power Supplies at over 100 kHz. International Rectifier.
3. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. М.: ИД «Додэка-XXI», 2005.
4. Донцов А. Мощные и эффективные IGBT седьмого поколения от IR // Силовая электроника. 2013. № 5.
5. Francis R., Soldano M. A New SMPS Non Punch Thru IGBT Replaces MOSFET in SMPS High Frequency Application. International Rectifier. 2003.