

Развитие IGBT-модулей от «Электрум АВ»

Компания «Электрум АВ» производит силовые IGBT-модули уже почти пятнадцать лет. За это время менялись технология и конструкция, комплектация и технические характеристики модулей... Заказчик диктовал все более жесткие требования, а значит, необходимо было и постоянное развитие. О путях развития IGBT-модулей и пойдет речь в статье.

Павел Новиков

Конструктив первых IGBT-модулей обусловило изначальное направление производства «Электрум АВ» — твердотельные реле. В качестве прототипов в то время были выбраны реле производства Crydom, и в частности, разработан корпус, аналогичный по габаритным и присоединительным размерам мощным модулям от Crydom. Этот конструктив получил наименование ДМ (рис. 1). И именно в этом конструктиве были изготовлены первые IGBT-модули, на несколько лет определившие первое поколение данного типа изделий.

С технической точки зрения не было препятствий для создания IGBT-модулей в конструктиве и с технологиями твердотельных реле. Ведь конструктивно реле также представляет собой сборку силовых транзисторов, расположенных на радиаторе, и установленную выше плату управления. Если убрать плату управления, фактически получается IGBT-модуль. Таким образом, первое поколение IGBT-модулей представляло собой сборку корпусных транзисторов в модуле с объемной герметизацией, по габаритным

и присоединительным размерам приближенным скорее к реле, нежели к IGBT-модулям как таковым.

Первое поколение имело преимущества в простоте технологии и дешевизне, при этом обладая высокой надежностью в работе со средней нагрузкой. Однако в жестких режимах эксплуатации проявлялись недостатки «релейного» подхода: реле, практически не имея динамических потерь, гораздо менее требовательно к тепловому сопротивлению, нежели, например, полумост, работающий на том же токе и напряжении, но при частоте 20 кГц. Необходимо было уменьшать тепловое сопротивление, чего можно было достичь только заменой корпусных транзисторов на кристаллы. Разумеется, кристаллы транзисторов также являли собой следующее поколение IGBT-транзисторов, что позволило улучшить и технические характеристики модулей (табл. 1). И если в конструктивном плане для потребителя это изменение было практически незаметно, то в плане технологии это была почти революция. Следовательно, и такие модули, хотя и конструктивно не отличались



Рис. 1. Внешний вид модулей в конструктиве ДМ



Рис. 2. Внешний вид модулей в конструктиве E2

от предыдущих, имели иные особенности в плане технологии производства, а потому являлись уже поколением 1+.

К поколению 1+ следует отнести менее мощные IGBT-модули в конструктивном исполнении E2, чей внешний вид приведен на рис. 2, они также имели в своей основе кристаллы. Однако в отличие от ДМ конструктив E2 изначально был заточен под IGBT-транзисторы, и его дальнейшее изменение практически не требовалось. А вот для ДМ назревала необходимость кардинальных изменений. Причина этих изменений все в том же изначальном базисе — релейной конструкции. В свое время габаритные и присоединительные размеры не были критичны для потребителя, но прогресс не стоял на месте, импортные модули активно завоевывали рынок, и потребитель стал желать «так же». Требовались те же габаритные размеры, как у «стандартных» импортных модулей, последовательное расположение шин для полумоста; «+» и «-», расположенные на линии не вдоль модуля, а поперек, уже не удовлетворяли сложившимся представлениям о топологии преобразователей. Ответом на требования заказчика стала разработка нового, второго поколения IGBT-модулей.

Второе поколение — это модули в конструктивах, аналогичных наиболее распространенным импортным конструкциям, таким как 62-мм корпус, имеющийся в номенклатуре почти всех производителей силовых модулей, и аналоги конструктивов sr6 и sr4 от Microsemi. Эти модули получили обозначения E3, M1 и M2 соответственно (рис. 3–5).

Таким образом, второе поколение IGBT-модулей уже полностью отвечало требованиям современного представления о силовом IGBT-модуле, причем и в плане конструкции, и в плане технологии, и в плане технических характеристик. Доказательством тому служит сравнение модулей FF200R12KE3 и M12-200-12-E3, приведенное в таблице 2.

Если отличия в поколениях 1 и 1+ заключались прежде всего в технологиях и почти не коснулись конструкции, то отличия между поколениями 1+ и 2, наоборот, в большей степени относились к конструкции, в то время как технологические изменения были уже не столь значительны. И поскольку, чтобы

Таблица 1. Основные параметры IGBT-транзисторов поколения 1 (в скобках) и поколения 1+ (без скобок)

Наименование параметра, единица измерения	Обозначение	Значение		
		Мин.	Тип.	Макс.
Предельнодопустимые режимы				
Напряжение коллектор-эмиттер (не более), В	V_{CES}			1200 (1200)
Напряжение затвор-эмиттер (не более), В	V_{GE}	-20 (-20)		20 (20)
Постоянный ток коллектора при $T_c = +25\text{ }^\circ\text{C}$ (не более), А	I_C			105 (100)
Импульсный ток коллектора при $t_{имп} = 1\text{ мс}$ (не более), А	I_{CM}			300 (240)
Температура перехода (не более), $^\circ\text{C}$	T_j	-55 (-55)		150 (150)
Статические характеристики				
Пороговое напряжение затвор-эмиттер, В	$V_{GE(th)}$	5 (4)		6,5 (6)
Ток утечки затвора (не более), нА	I_{GES}	-600 (-100)		600 (100)
Напряжение насыщения коллектор-эмиттер (не более), В	$V_{CE(on)}$		1,65 (2,5)	2,05 (2,75)
Ток утечки коллектора (не более), мкА	I_{CES}			500 (100)
Динамические характеристики				
Входная емкость (типичная), пФ	C_{ies}		7210 (4300)	
Проходная емкость (типичная), пФ	C_{res}		377 (395)	
Время задержки включения (не более), нс	$t_{d(on)}$			290 (94)
Время нарастания (не более), нс	t_r			50 (45)
Время задержки выключения (не более), нс	$t_{d(off)}$			520 (400)
Время спада (не более), нс	t_f			90 (58)

Таблица 2. Сводная таблица параметров модулей FF200R12KE3 и M12-200-12-E3

Наименование параметра, единица измерения	Обозначение	Значение		
		Мин.	Тип.	Макс.
Основные характеристики				
Пробивное напряжение коллектор-эмиттер (не менее), В	$V_{(BR)CES}$	1200 (1200)		
Постоянный ток силовой цепи (не более), А	I_{DC}			200 (200)
Рассеиваемая мощность (не более), Вт	P_D			1050 (830)
Тепловое сопротивление кристалл-теплопровод IGBT, $^\circ\text{C}/\text{Вт}$	$R_{T(j-c)}$			0,12 (0,15)
Статические характеристики				
Пороговое напряжение затвор-эмиттер, В	$V_{GE(th)}$	5 (4,5)		6,5 (6,5)
Ток утечки затвора (не более), нА	I_{GES}	-400 (-500)		400 (500)
Напряжение насыщения коллектор-эмиттер (не более), В	$V_{CE(on)}$		1,7 (1,7)	2,15 (2,2)
Ток утечки коллектора (не более), мкА	I_{CES}			500 (100)
Динамические характеристики				
Входная емкость (типичная), пФ	C_{ies}		14000 (6000)	
Проходная емкость (типичная), пФ	C_{res}		250 (300)	
Время задержки включения (не более), нс	$t_{d(on)}$			250 (200)
Время нарастания (не более), нс	t_r			90 (200)
Время задержки выключения (не более), нс	$t_{d(off)}$			550 (700)
Время спада (не более), нс	t_f			130 (150)
Общий заряд затвора (типичной), нКл	Q_G			1900 (800)
Предельнодопустимые режимы				
Напряжение коллектор-эмиттер (не более), В	V_{CES}			1200 (1200)
Напряжение затвор-эмиттер (не более), В	V_{GE}	-20 (-20)		20 (20)
Постоянный ток коллектора при $T_c = +25\text{ }^\circ\text{C}$ (не более), А	I_C			295 (240)
Постоянный ток коллектора при $T_c = +100\text{ }^\circ\text{C}$ (не более), А	I_C			200 (200)
Импульсный ток коллектора при $t_{имп} = 1\text{ мс}$ (не более), А	I_{CM}			800 (600)
Температура перехода (не более), $^\circ\text{C}$	T_j	-40 (-40)		150 (150)



Рис. 3. Внешний вид модулей в конструктиве E3



Рис. 4. Внешний вид модулей в конструктиве M1



Рис. 5. Внешний вид модулей в конструктиве M2



Рис. 6. Внешний вид модулей третьего поколения в конструктиве МЗ

не отставать от прогресса, требуется все больше и больше усилий, то для создания поколения 3 понадобилось пересмотреть подходы как в технологическом, так и в конструктивном направлении.

IGBT-модули третьего поколения — это малогабаритные силовые модули с низким профилем в конструктивном исполнении МЗ (внешний вид модуля приведен на рис. 6), аналогичном конструктиву Sot-227.

Данное конструктивное исполнение требует множества изменений и в части технологии производства. Шины специальной конструкции, выдерживающие значительно большее количество термоциклов относительно мо-

дулей второго поколения и тем более относительно первого поколения (модули с объемной герметизацией); корпус, изготовленный по технологии трансферного литья; минимизация длинных связей с целью уменьшить паразитные индуктивности и т. д. В части технологии данный модуль содержит новшеств больше, чем все предыдущие поколения, вместе взятые. В настоящее время третье поколение еще проходит стадию опытных образцов и предварительных испытаний, но так же, как со всей неизбежностью менялись предыдущие поколения, так и модули типа МЗ являются неизбежным будущим для IGBT-модулей производства «Электрум АВ».