

Отечественные высоковольтные силовые IGBT- и FRD-модули прижимной конструкции в металлокерамических корпусах

В статье представлен новый отечественный комплект ЭКБ силовой электроники АО «Микрон» — высоковольтные силовые IGBT- и FRD-модули прижимной конструкции в герметичных металлокерамических корпусах. Для предприятия эта работа являлась пионерской как в постановке новой технологии изготовления кристаллов IGBT и FRD, так и в их измерениях, сборке, испытаниях и обеспечении качества выпускаемых приборов. Описаны конструкции силовых модулей и их элементов, ключевые особенности их сборки и выходного контроля, приведены электрические параметры модулей.

**Алена Быкова
Ярослав Вренев**

dinfo2004@bk.ru

**Артем Гавриленко
Татьяна Крицкая
Павел Машевич**

mashevich@ckp-miet.ru

**Антон Полохов
Юлия Смирнова
Евгений Шмаков**

Прижимная и паяная конструкции силовых модулей

Одна из концепций, лежащая в основе технологии прижимных (Press-Pack) IGBT-модулей, — это последовательное соединение модулей в стеки и возможность их применения в агрессивных климатических условиях. Электрическое соединение силовых выводов обеспечивается сжатием внешних контактных поверхностей, а подключение управляющего вывода осуществляется с помощью ножевого разъема.

В прижимной конструкции IGBT-модулей предусмотрено полностью симметричное распределение как тепловых сопротивлений, так и паразитных индуктивностей со стороны эмиттера и коллектора. Паяная конструкция с изолированным основанием имеет существенные различия данных параметров с коллекторной и эмиттерной стороны. В ней верхняя часть кристалла соединяется с силовыми шинами крепежными элементами, а нижняя часть кристалла припаяна к керамической DBC-подложке. Подложка в свою очередь

припаяна к металлическому основанию, выполняющему функцию радиатора. Кроме того, в процессе эксплуатации модули паяной конструкции подвержены из-за циклических изменений температуры развитию деградаций внутренних компонентов, что вызвано термомеханическими напряжениями, возникающими за счет существенного различия коэффициентов температурного линейного расширения (КТЛР) компонентов модуля. Типичными отказами являются отрыв проводника, потеря качества паяного соединения, трещины в припое, проводниках и изоляторе подложки. Технология прижима исключает развитие усталостных процессов, свойственных паяным и сварным соединениям, гарантируя его высокую надежность и устойчивость к механическим и климатическим воздействиям. Типовые структуры IGBT-модулей в разрезе для паяной и прижимной конструкций приведены на рис. 1.

Прижимная конструкция в отличие от паяной эффективнее отводит тепло, которое обеспечивается, в первую очередь, за счет реализации двухстороннего охлаждения в данном варианте конструкции,

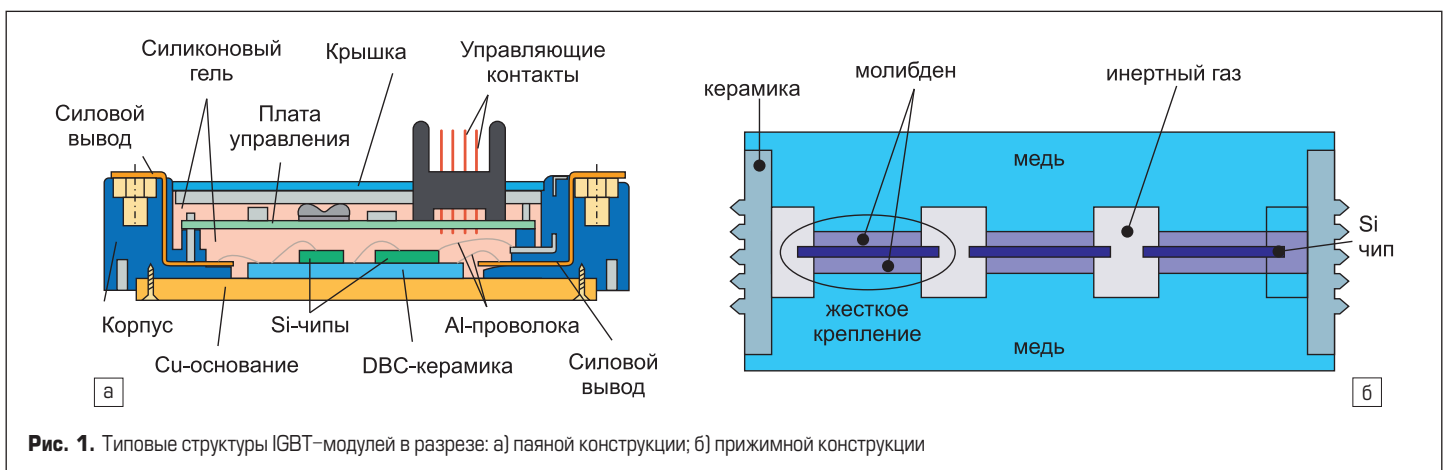


Рис. 1. Типовые структуры IGBT-модулей в разрезе: а) паяной конструкции; б) прижимной конструкции

Таблица 1. Теплофизические характеристики материалов, используемых при производстве IGBT-модулей

Наименование материала	Паяная конструкция						Прижимная конструкция			
	Si	Припой	Cu	Al ₂ O ₃	Ni	Al	Si	Mo	Ag	Cu
λ (Вт/(см·К))	1,4	0,55	4	0,25	0,8	2	1,4	1,38	4,3	4
КТЛР (×10 ⁻⁶ , К ⁻¹)	2,54	11,6	16,6	7,2	13	22,2	2,54	5	19,5	16,6

Таблица 2. Сравнительные характеристики прижимной и паяной конструкции модулей

Требования	Конструкция	
	Паяная конструкция	Прижимная конструкция
Надежность	Средняя: • слабое место паяные и сварные соединения; • негерметичный металлопластмассовый корпус.	Высокая: • отсутствие паяного и сварного соединения; • герметичный металлокерамический корпус.
Возможность последовательного соединения	Нет, за исключением применений с неограниченными массогабаритными оказателями: • крепление к радиатору винтами; • изолированное основание; • сложная механическая конструкция готового решения.	Да: • прижим с высоким усилием; • радиаторы должны отвечать высоким требованиям к плоскостности и параллельности; • распределенное давление неравномерное при допусках на плоскостность и параллельность традиционных контактных устройств, соединенных последовательно.
Режим работы при коротком замыкании	Нет: • обрыв цепи в структуре модуля (обрыв проволоки)	Да: • кристалл и прижимные контакты образуют единый проводник
Взрывостойкость	Низкая: • обрыв цепи в структуре модуля (обрыв проволоки)	Высокая: • отсутствие сварных соединений
Охлаждение	Одностороннее: • высокое тепловое сопротивление (отвод тепла со стороны подложки)	Двухстороннее: • низкое тепловое сопротивление (отвод тепла с обеих сторон)
Паразитная индуктивность	Высокая: • не сбалансирована между кристаллами	Низкая: • сбалансирована между кристаллами
Технологичность	Низкая: • большое количество технологических операций	Высокая: • минимальное количество технологических операций

во-вторых, благодаря использованию материалов с высокой теплопроводностью.

Используемые материалы и значения их теплопроводности при сравнении двух различных конструкций исполнения приведены в таблице 1.

Краткие сравнительные характеристики прижимной и паяной конструкции модуля приведены в таблице 2.

Исходя из вышеизложенных фактов для изделий с ответственным применением и требованиями к высокой надежности рекомендуется использовать модули прижимной конструкции в герметичном исполнении.

Модули прижимной конструкции АО «Микрон»

При проектировании и изготовлении собственно силовых модулей, ячеек, входящих в состав модулей, и кристаллов силовых приборов, входящих в состав ячеек, АО «Микрон» были обобщены, учтены и реализованы ряд сформулированных ниже требований.

К конструкции прижимных модулей предъявляются следующие требования:

- равномерное распределение внешнего прижимного усилия между кристаллами IGBT-и/или FRD, входящими в состав модуля, для равномерной электрической и тепловой нагрузки;
- безотказная работа модуля в случае пробоя одного из его кристаллов, прохождение рабочего тока через модуль без его теплового и механического разрушения, а также устойчивое состояние высокой проводимости независимо от уровня протекающего через него тока;

- низкая и равномерно распределенная между кристаллами для одновременного их включения паразитная индуктивность в цепи затвор-эмиттера;

- высокая стойкость к внешним воздействующим факторам для использования модулей в агрессивных средах.

К ячейкам, используемым в корпусе модуля, предъявляются следующие требования:

- минимальный разброс по толщине, плоскостности и параллельности ячеек и их комплектующих для равномерно распределения давления на все кристаллы в корпусе;

- 100%-контроль электрических параметров при нормальных условиях и в диапазоне температур перед сборкой в корпус;
- высокие изоляционные характеристики используемых в ячейках полимерных материалов.

К кристаллам, используемым в прижимных конструкциях, предъявляются следующие требования:

- толщина металла эмиттера не менее, чем в 2 раза больше толщины металла для паяной конструкции;
- минимальный разброс толщин кристаллов, установленных в модуль, так как при сжатии модуля возможно отсутствие электрического контакта к кристаллам с меньшей толщиной;
- максимально возможная площадь прижима с лицевой и обратной стороны кристалла, для снижения локального избыточного давления;
- минимальный разброс по параметру пороговое напряжение или ужесточение контроля при измерении данного параметра, для минимизации разбаланса токов между кристаллами в процессе их включения, допускается создание групп данного параметра для использования кристаллов в разных сборках модулей;
- высокие блокирующие характеристики, а также малое падение во включенном состоянии.

«Микрон» разработал и серийно освоил три конфигурации высоковольтных 4500-В модулей прижимной конструкции на основе кристаллов собственного производства:

- модуль МПТКИ2400-45 (ток 2400 А) АДКБ.432170.613 ТУ на основе кристаллов IGBT-транзисторов;
- модуль МПТКИ1800-45Д (ток 1800 А) АДКБ.432170.614 ТУ на основе кристаллов IGBT-транзисторов и комплектных кристаллов антипараллельных диодов FRD;
- модуль FRD МПДЧ2400-45 (ток 2400 А) АДКБ.432170.615 ТУ на основе разделенных кристаллов диодов.

Таблица 3. Общий вид и габаритные размеры разработанных модулей

Наименование	МПТКИ2400-45, МПТКИ1800-45Д	МПДЧ2400-45
Общий вид модуля		
Габаритный чертеж		

Таблица 4. Предельно допустимые параметры модулей производства АО «Микрон»

Наименование параметра, обозначение, единица измерения	Значение параметра		
	МПТКИ2400-45	МПТКИ1800-45Д	МПДЧ2400-45
Максимально допустимое напряжение коллектор-эмиттер, $U_{КЭ, макс}$, В	4500	4500	—
Максимально допустимое повторяющееся импульсное обратное напряжение, $U_{ОБР(и), макс}$, В	—	—	4500
Максимально допустимое напряжение затвор-эмиттер, $U_{ЭЭ, макс}$, В	±20	±20	—
Максимально допустимый постоянный ток коллектора ¹ , $I_{К(п), макс}$, А	2400	1800	—
Максимально допустимый средний прямой ток ¹ , $I_{пр(ср.), макс}$, А	—	—	2500
Максимально допустимый импульсный ток коллектора ² , $I_{К(и), макс}$, А	4800	3600	—
Максимально допустимый импульсный прямой ток ² , $I_{пр(и), макс}$, А	—	—	5000
Максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность ³ , $P_{макс}$, кВт	19	13,7	13
Максимально допустимая температура перехода, $T_{пер, макс}$, °С	125	125	150

Примечания.

1. При температуре корпуса -40...+25 °С.
2. Ширина импульса ограничена максимально допустимой температурой перехода.
3. Максимально допустимую постоянную рассеиваемую мощность, $P_{макс}$, Вт, в диапазоне температур корпуса транзисторов $T_K +25...+100$ °С вычисляют по формуле:

$$P_{макс} = (T_{пер, макс} - T_K) / R_{тл-к}, (1)$$

где $T_{пер, макс}$ — максимально допустимая температура перехода, °С; T_K — температура корпуса, °С; $R_{тл-к}$ — тепловое сопротивление переход-корпус, °С/Вт.

Общий вид и габаритные чертежи на модули прижимной конструкции АО «Микрон» приведены в таблице 3.

Технические характеристики модулей приведены в таблице 4.

Конструкция модулей прижимная, полностью герметичная, исключая пайку и сварку. Благодаря этому IGBT-модули имеют возможность равномерного двухстороннего охлаждения, что обеспечивает повышенную устойчивость к термоциклированию. Кроме того, ячеистая внутренняя структура, состоящая из множества одинаковых кристаллов, соединенных параллельно, обеспечивает более равномерное распределение механических напряжений в результате тепловых расширений по сравнению с классическими тиристорными или диодными с одним большим кристаллом, где данные механические напряжения накапливаются от центра к периферии.

Ключевым элементом IGBT-модулей прижимной конструкции является ячейка из одного IGBT-или FRD-кристалла. Конструкция ячейки модуля представлена на рис. 2, а конструкция модуля приведена на рис. 3.

При проектировании IGBT-кристалла выбор размера кристалла имеет существенное значение. При увеличении площади кристалла улучшается соотношение активной площади к общей, то есть возрастает плотность тока на единицу площади. Для модулей прижимной конструкции «Микрон» разработал и изготавливает IGBT кристаллы размером 14,4×14,4 мм. В качестве примера, по сравнению с двумя малыми кристаллами, суммарные размеры которых также равны 14,4×14,4 мм, максимальный ток кристалла возрастает не менее чем на 15%. В технологический процесс изготовления кристаллов включена операция облучения высокоэнергетическими частицами легких ионов для формирования локальных областей, для

улучшения динамических параметров приборов в процессе переключений и сохранения низких потерь в проводящем состоянии.

При проектировании конструкции корпуса модуля количество размещенных в нем ячеек доведено до 44 шт., что позволило получить суммарный ток модуля ≥ 2400 А. При проектировании также оптимизирована конструкция управляющей платы, что дало уменьшение паразитной индуктивности и ее равномерное распределение между ячейками.

Особенностью модулей прижимной конструкции АО «Микрон» является использование отечественных кристаллов IGBT и FRD собственного производства, а также оригинальное решение в конструкции ячеек [1]. Конструкция и технология изготовления ячеек АО «Микрон» по сравнению с импортными аналогами позволяет проводить полный контроль электрических параметров ячеек без использования инертной среды до их сборки в модуль. Одним из основных тестов проверки работоспособности ячеек является проверка обратного тока коллектор-эмиттер при номинальном напряжении коллектор-эмиттер (4500 В), а также контроль на устойчивость к двойному импульсу переключения. Тест проводится на индуктивную нагрузку.

Типовые выходные ВАХ ячейки IGBT транзистора приведены на рис. 4 и 5.

Результаты измерений динамических параметров ячейки IGBT транзистора приведены в таблице 5. Осциллограммы переключений изображены на рис. 6 и 7.

После сборки ячеек в корпус модуля и герметизации в инертной среде надежность показатели модуля повышаются.

В составе периодических испытаний, в перечень которых входит проверка устойчивости модулей к токовой перегрузке, проводится тест на устойчивость модуля к току короткого замыкания с длительностью не менее 10 мкс.

Разработанные высоковольтные модули прижимной конструкции проходят испытания в преобразователях частоты для систем электродвижения ледоколов проекта 22220,

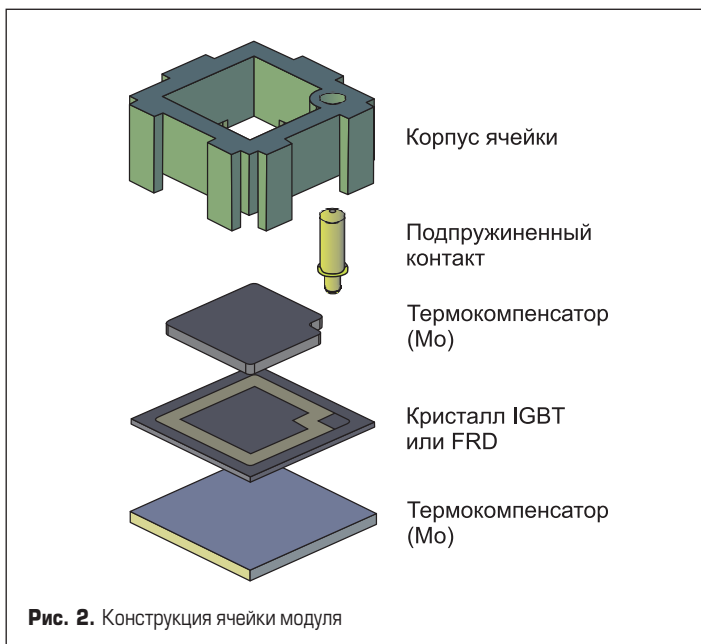


Рис. 2. Конструкция ячейки модуля

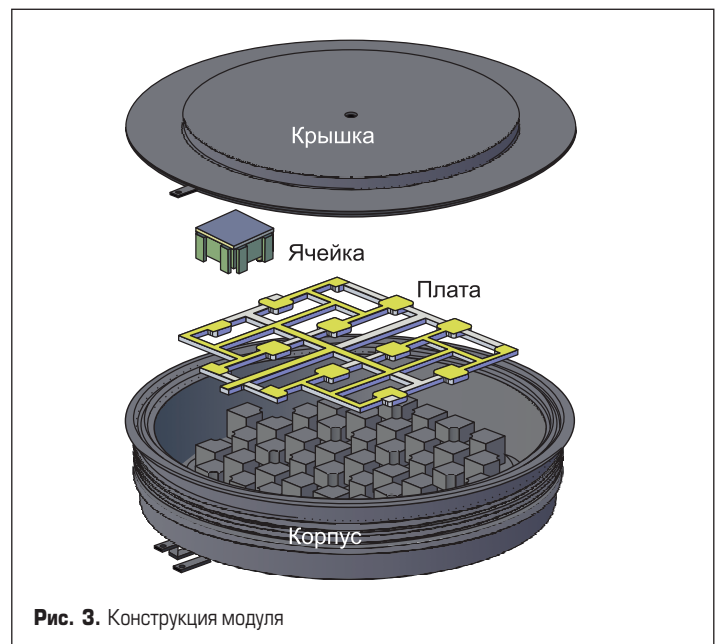


Рис. 3. Конструкция модуля

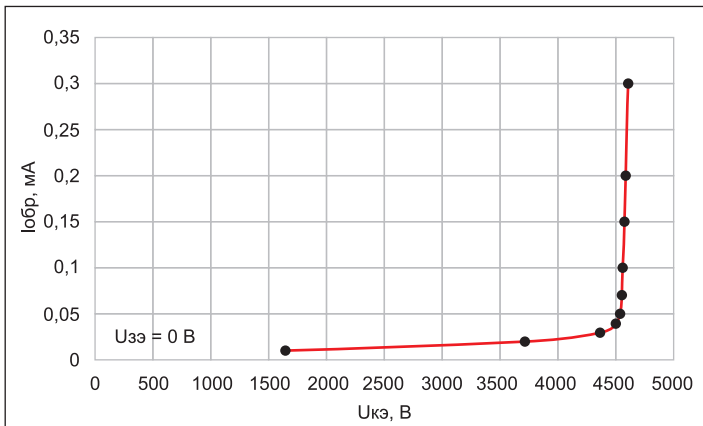


Рис. 4. Типовая ВАХ обратного тока коллектор-эмиттер от напряжения коллектор-эмиттер при напряжении на затвор-эмиттер 0 В

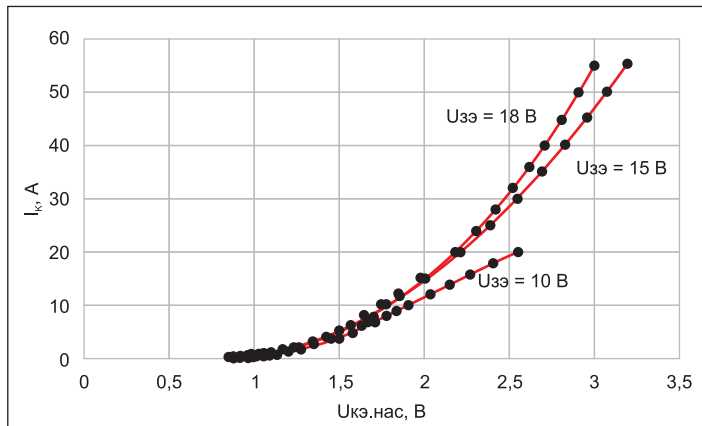


Рис. 5. Типовая ВАХ напряжения насыщения коллектор-эмиттер от тока коллектора при напряжении на затвор-эмиттер

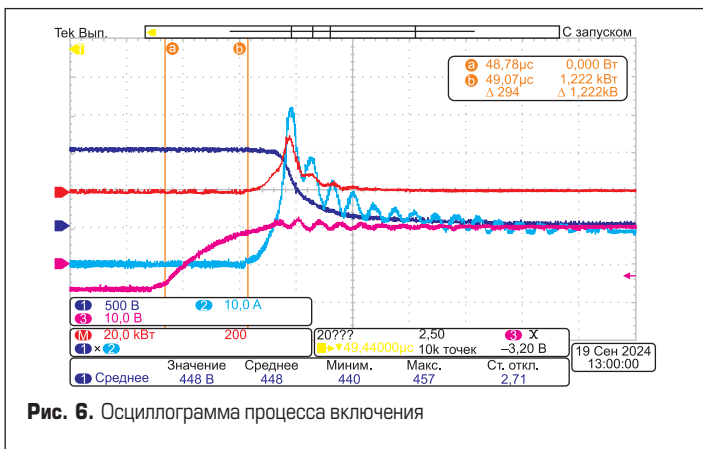


Рис. 6. Осциллограмма процесса включения

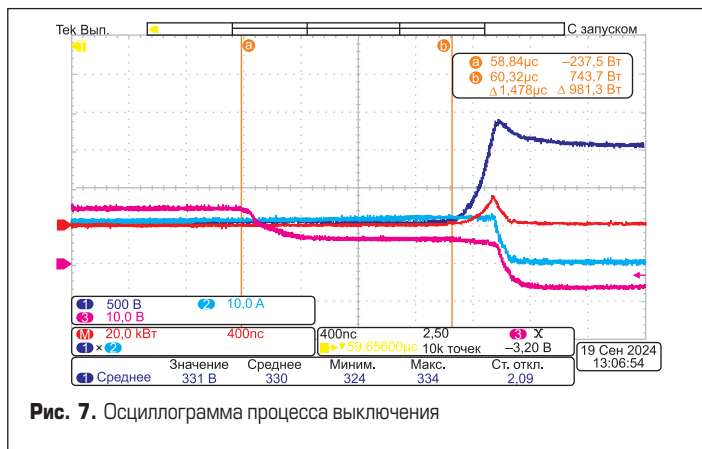


Рис. 7. Осциллограмма процесса выключения

Таблица 5. Результаты измерений динамических параметров ячейки IGBT 4500 В 55 А

Наименование параметра, единица измерения	Время задержки включения, нс	Время нарастания, нс	Время задержки выключения, нс	Время спада, нс	Энергия потерь на включении, мДж	Энергия потерь на выключении, мДж
Режим измерений: $U_{кэ} = 1000 \text{ В}; I_k = 10 \text{ А};$ $U_{зэ} = 15/-8 \text{ В}; R_3 = 36 \text{ Ом}$	300	150	1480	100	3,6	2,6

а также в составе тяговых преобразователей железнодорожного транспорта.

АО «Микрон» продолжает развитие на своем предприятии ЭКБ силовой электроники. Ведется разработка кристаллов IGBT и FRD для ряда стандартных напряжений 1200, 1700, 3300 и 6500 В с использованием канавочной (trench) технологии, а также других улучшенных структур и конструкций.

Модули прижимной конструкции АО «Микрон» МПТКИ2400-45, МПТКИ1800-45Д и МПДЧ2400-45 обеспечивают высокий уровень надежности в экстремальных климатических условиях эксплуатации, а также являются альтернативой паяным модулям с изолированным основанием, когда необ-

ходимо коммутировать высокие мощности, ведь проще включить последовательно два модуля прижимной конструкции, чем параллельно соединять высоковольтные модули с изолированным основанием. Появление на рынке новой продукции компании АО «Микрон» позволяет в полном объеме заместить изделия-аналоги зарубежного производства.

Заключение

Литература

1. Врнев Я. А., Машевич П. Р., Быкова А. В., Шмаков Е. В., Шипигузов А. В. Силовой высоковольтный транзистор с изолированным затвором: пат. 224482 РФ: СПК52 Н01L 23/485 (2024.01); Н01L 29/78 (2024.01).