DOI: 10.22184/1992-4178.2024.241.10.154.162

Тенденции корпусирования и сборки дискретных силовых элементов на базе полевых МОП-транзисторов

В. Иванов[1], Д. Суханов[2]

УДК 621.3 | ВАК 2.2.2

Силовые полупроводниковые устройства широко используются в энергетике, машиностроении, аэрокосмической технике и других отраслях. В статье рассмотрены различные виды силовых полупроводниковых устройств. Приведена информация о корпусах разных типов для силовых элементов на базе полевых МОП-транзисторов, предлагаемых рядом производителей.

Представим силовые элементы (СЭ) в виде схемы (рис. 1а) и покажем структуру полевого МОП-транзистора (MOSFET) (рис. 1б). Все СЭ можно разделить на несколько типов (табл. 1). При этом СЭ различаются по рабочим параметрам, таким как рабочее и выдерживаемое напряжение, рабочий и допустимый ток, импеданс и пропускная способность. Выбор подходящего СЭ и его исполнения будет зависеть от области применения и предъявляемых требований. Основные преимущества и недостатки СЭ приведены в табл. 2.

В полупроводниковой промышленности постоянно происходят изменения из-за внедрения и развития новых материалов (табл. 3), но самым распространенным материалом остается кремний (Si).

В табл. 4 обобщены основные различия между силовыми элементами.

ПОЧЕМУ MOSFET?

Простой процесс производства, высокое входное сопротивление, низкий уровень шума, хорошая термостойкость, высокий коэффициент усиления – эти характеристики определяют выбор MOSFET. Их основные параметры: напряжение сток-исток V_{DS} (выдерживаемое напряжение), ток стока I_D, сопротивление R_{DS} (R_{ON}) в открытом состоянии, емкость перехода C_J, добротность (показатель качества) $FOM = R_{ON} \cdot Q_g$ (Q_g – полный заряд затвора).

Разделение по производственному процессу:

- траншейного типа (для низких напряжений до 100 В);
- с разделенным затвором (для низких и средних напряжений до 200 В);
- с суперпереходом (для высоких напряжений 600–800 В).

Большую часть рынка MOSFET занимают компании Infineon, лидер отрасли, и Onsemi. Остальные игроки – Renesas, Toshiba, IWC, ST, Vishay, Nexperia, Magna и др.

В Китае есть локальные производители – Silan, China Resources Micro (Aviation), Jilin Huawei, которые уже уверенно выходят на международный рынок.

КЛАССИФИКАЦИЯ КОРПУСОВ

Все корпуса для полупроводниковых приборов делятся по методу монтажа на печатную плату (ПП) – вставные и для поверхностного монтажа (ПМ). У вставных корпусов контакты проходят через монтажные отверстия ПП и припаиваются к ней, данный класс делится на DIP, TO и PGA (рис. 2).

В методе ПМ выводы и теплоотвод припаиваются к контактным площадкам на поверхности ПП. Типовыми для ПМ являются корпуса D-PAK, SOT, SOP, QFP, PLCC и др. (рис. 3).

С развитием технологий сборок на ПП все меньше применяют корпуса вставного класса, используя корпуса для ПМ. Рассмотрим каждый тип корпуса.

Корпуса DIP

Варианты DIP-корпусов – керамический (CDIP), пластиковый (PDIP), малогабаритный пластиковый (SPDIP). Особенность DIP-корпусов заключается в том, что за счет длины выводных штифтов они могут монтироваться сначала на вспомогательную ПП (sub board), а затем на основную (main board), за исключением SDIP, который имеет плотность контактов в шесть раз выше, чем у DIP. Количество контактов у DIP-корпусов достигает 100. Из-за интеграции технологических процессов применение DIP-корпусов постепенно снижается.

Корпуса TO

Модификации корпусов данного типа – TO-3P, TO-247, TO-92, TO-92L, TO-220, TO-220F, TO-251 и др. (рис. 4).

[1] ООО «Остек-ЭК», начальник группы, ivanov.v@ostec-group.ru.

[2] ООО «Остек-ЭК», заместитель технического директора, sukhanov.d@ostec-group.ru.

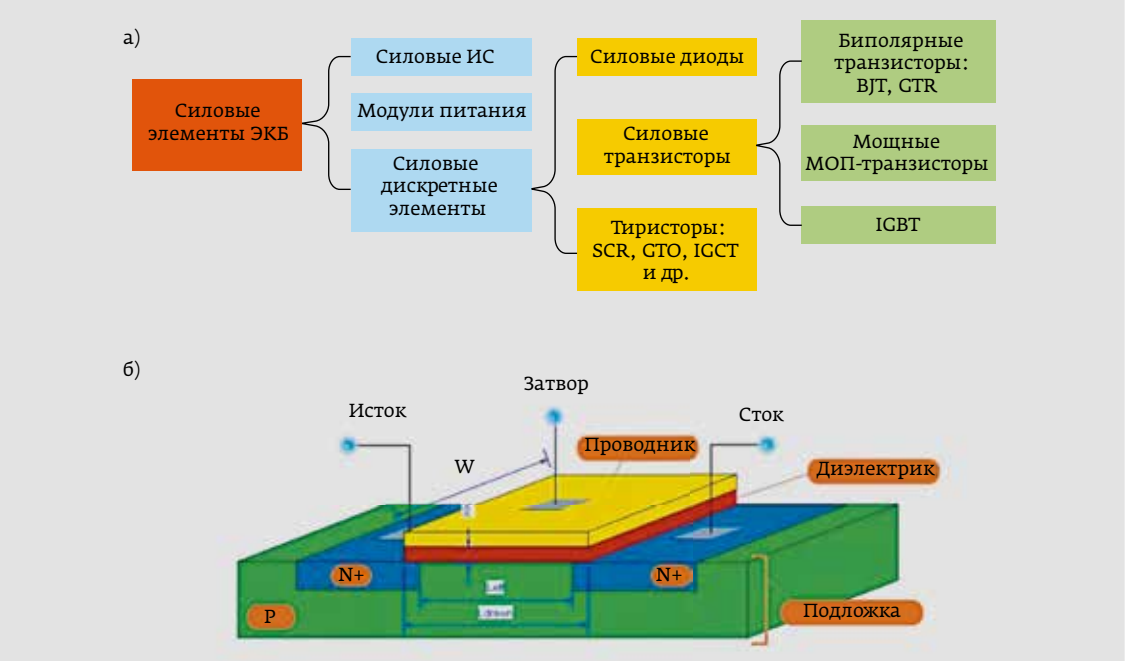

Рис. 1. Виды силовых элементов (а) и структура MOSFET (б)

TO-3P/247 – широко используемый форм-фактор для силовых MOSFET среднего и высокого напряжения при больших токах. Имеет хорошие эксплуатационные характеристики, такие как высокие выдерживаемое напряжение и сопротивление электрическому пробою.

TO-220/220F. TO-220F – полностью пластиковый корпус, не требующий изоляционной прокладки при его установке на радиатор; TO-220 имеет металлическое основание, соединенное со средним выводным штырем, и при установке радиатора требуется изолирующая прокладка.

TO-251 – имеют меньшие массогабаритные показатели, могут применяться при напряжении до 700 В и токе до 60 А.

TO-92 – используют для снижения себестоимости (ток до 10 А, напряжение до 60 В).

Из-за плохого рассеивания тепла и высокой стоимости пайки вставных корпусов спрос на транзисторы для ПМ вырос, что привело к развитию технологии TO, и появились корпуса TO-252 (также известные как D-PAK) и TO-263 (D2PAK).

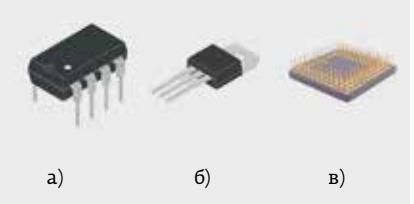

Рис. 2. Вставные корпуса: а – DIP; б – TO; в – PGA

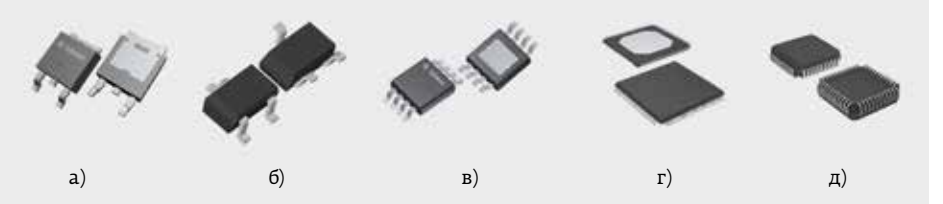

Рис. 3. Корпуса для поверхностного монтажа: а – D-PAK; б – SOT; в – SOP; г – QFP; д – PLCC

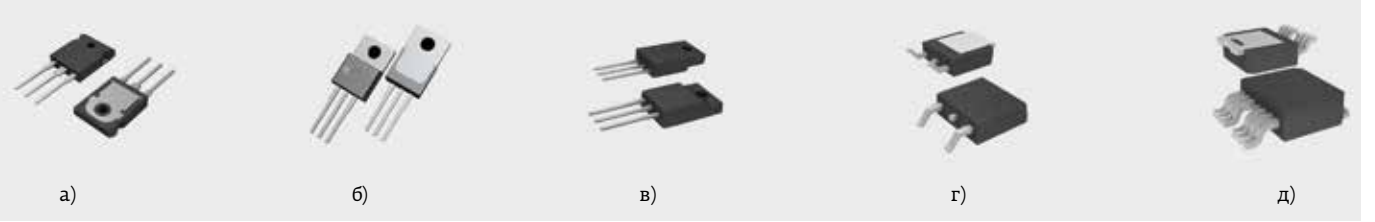

Рис. 4. Внешний вид корпусов TO: а – TO-247; б – TO-220; в – TO-220F; г – D-PAK; д – D2PAK

TO252/D-PAK – пластиковый корпус для ПМ, обычно применяемый для силовых транзисторов и стабилизаторов напряжения, сегодня является одним из самых ходовых (рис. 5а). MOSFET в этом корпусе имеет три электрода: затвор (G), сток (D) и исток (S). Вывод стока (D) обрубается и не используется, а радиатор на задней панели используется как сток (D), который паяется непосредственно к ПП.

TO-263/D2PAK (рис. 5б) – вариант исполнения TO-220 для повышения производительности и рассеивания тепла, чаще всего встречается как MOSFET среднего напряжения от 30 В под большие токи до 150 А. TO263-2, TO263-3, TO263-5, TO263-7 отличаются количеством выводов и расстоянием между ними.

Корпуса PGA

Корпуса данного типа имеют массив штыревых контактов на обратной стороне в виде рядов. При монтаже микросхема вставляется в специальное гнездо PGA, которое отличается простотой подключения, высокой надежностью и может адаптироваться под высокие частоты.

Большая часть подложек для PGA изготавливается из керамического материала, шаг между контактами составляет 2,54 мм, а их количество варьируется от 64 до 447.

Чем меньше площадь корпуса PGA, тем меньше энергопотребление и производительность, и наоборот. Данный тип корпусов был востребован для изделий с высоким энергопотреблением (процессоры Intel) и не распространен для полевых МОП-транзисторов.

Корпуса SOT

Эти корпуса (рис. 6) разработаны под маломощные транзисторы и имеют более компактное исполнение в сравнении с TO. Типы: SOT23, SOT89, SOT143, SOT25 (SOT 23-5), SOT323, SOT363/SOT26 (SOT 23-6) и др.

SOT23 – это широко используемая форма корпуса для триодов. У SOT23 три вывода в форме крыла чайки – коллектор, эмиттер и база. Корпус имеет хорошую прочность, но плохую паяемость.

SOT89 имеет три коротких вывода на одной стороне транзистора, а другая сторона – металлический радиатор, соединенный с основанием для увеличения отвода тепла. Применяется для силовых Si-транзисторов под ПМ.

SOT143 имеет четыре коротких вывода в форме крыла чайки с обеих сторон; широкий конец вывода – коллектор. Обычно используется под высокочастотные транзисторы.

SOT252 – мощный транзистор с тремя выводами по одной стороне. Средний из них короче других и является

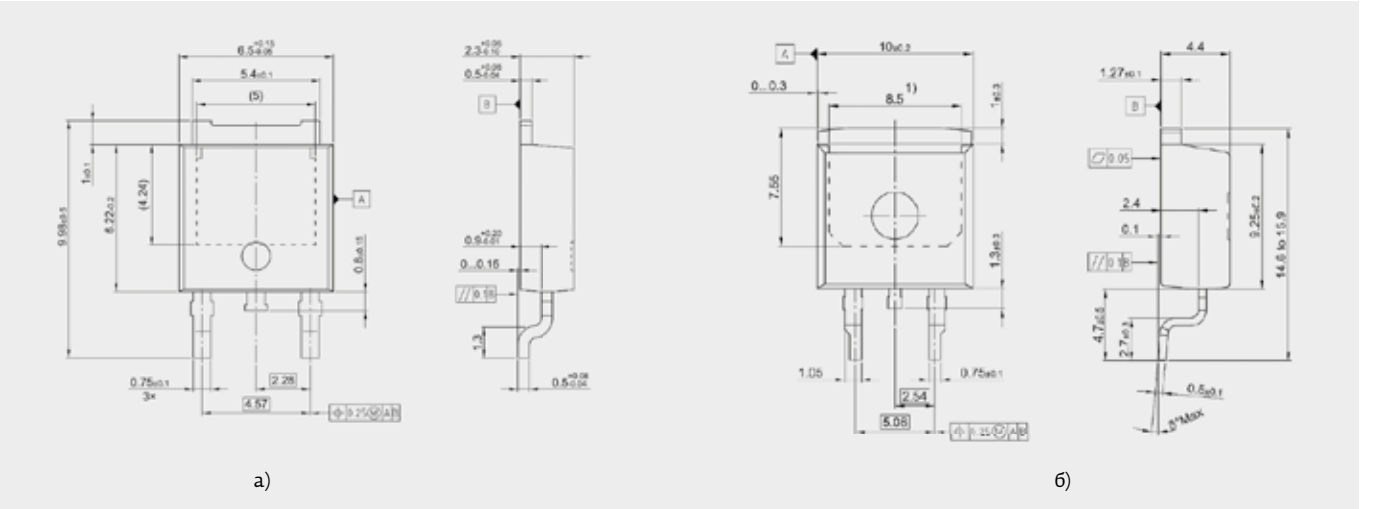

Рис. 5. Размеры (в мм) корпусов TO252/D-PAK (а) и TO-263/D2PAK (б)

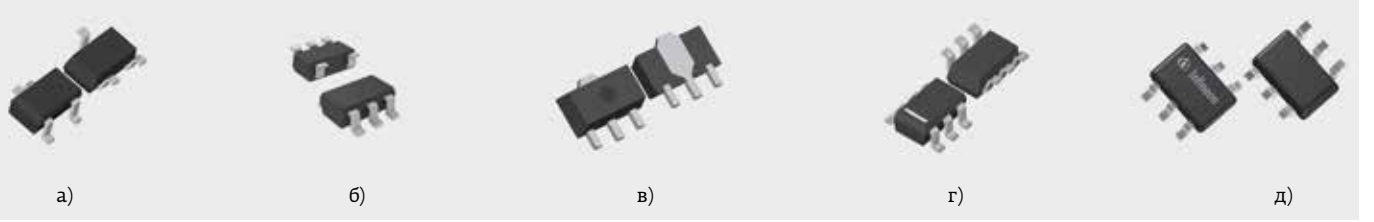

Рис. 6. Виды корпусов SOT: а – SOT23; б – SOT323; в – SOT89; г – SOT23-6; д – SOT363/SOT26

коллектором. Он подключен к большему контакту, который представляет собой медный лист для отвода тепла. Форм-фактор SOT252 очень похож на D-PAK.

Корпуса SOP

Корпуса SOP имеют контакты в форме крыла чайки с обеих сторон. Изготавливаются из пластика или керамики. Типы: SOP-8, SOP-16, SOP-20, SOP-28 и др. (число указывает на количество контактов). Для MOSFET самым распространенным является SOP-8, в отрасли имеет обозначение SO.

SO-8 был разработан компанией PHILIPS. В пластиковом исполнении он не имеет нижней металлической пластины для рассеивания тепла, поэтому используется для маломощных MOSFET. Компактные варианты: TSOP, VSOP, SSOP и TSSOP. TSOP и TSSOP часто используют для MOSFET (рис. 7).

Корпуса QFP

QFP – это усовершенствованные PGA для одной большой ИС (БИС). Количество тонких выводов с маленьким расстоянием превышает 100.

Особенности корпусов данного типа:

- выдерживают режимы поверхностного монтажа;
- подходят для работы в ВЧ-диапазоне;
- обладают высокой надежностью и просты в эксплуатации;
- близкое соотношение габаритов кристалла и корпуса.

Недостаток – плохой отвод тепла.

Корпуса QFN

У QFN контакты расположены на обратной стороне. Это самый востребованный пластиковый корпус под ПМ с высокой плотностью контактов и малыми массогабаритными параметрами. QFN схож с TSSOP, но габариты на 62% меньше, тепловые характеристики на 55% выше.

Корпуса PLCC

PLCC – это последнее из стандартных решений корпусирования. Корпуса имеют квадратную форму и по габаритам меньше, чем DIP-корпуса. J-образные контакты (от 18 до 84, с расстоянием 1,27 мм) не так легко деформируются и с ними проще работать в сравнении с QFP, но визуальный контроль после пайки сложнее. Корпуса PLCC подходят для SMT-монтажа, имеют малые размеры и высокую надежность, используются для БИС или ПЛК, редко – для силовых МОП-транзисторов.

НЕСТАНДАРТНЫЕ РЕШЕНИЯ ПО КОРПУСИРОВАНИЮ

Для ЦП с низким напряжением и высоким током MOSFET должен обладать следующими параметрами: большой выходной ток, низкое сопротивление во включенном состоянии, быстрое рассеивание тепла и небольшой размер.

Корпуса WPAK и LFPAK от Renesas

На рис. 8а представлен WPAK-корпус с высоким рассеиванием тепла, что достигается путем припайки металлической пластины на обратной стороне микросхемы к материнской плате и рассеивания тепла через материнскую плату. При этом WPAK компактнее D-PAK. Позже был разработан WPAK-D2 (рис. 8б) с двумя МОП-транзисторами

Рис. 7. Корпуса SOP для MOSFET: а – TSOP6; б – TTSOP-8

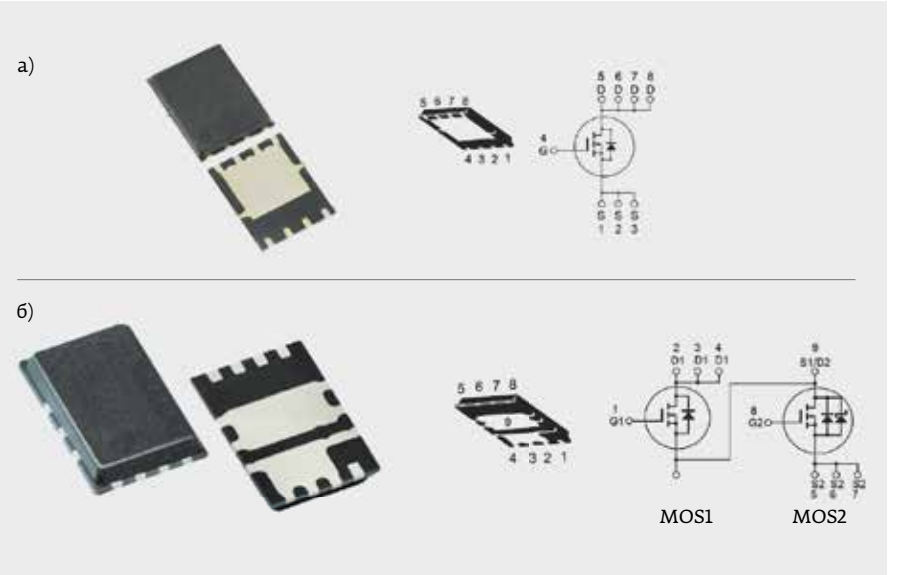

Рис. 8. Первый вариант исполнения корпуса WPAK-D1 (а) и второй WPAK-D2 с уменьшенной индуктивностью (б)

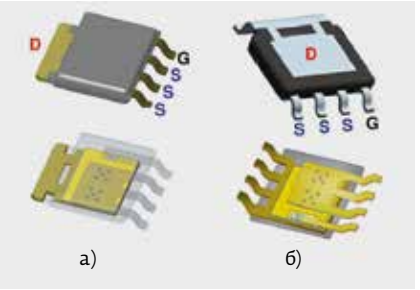

Рис. 9. Корпуса LFPAK (а) и LFPAK-i (б) компании Renesas

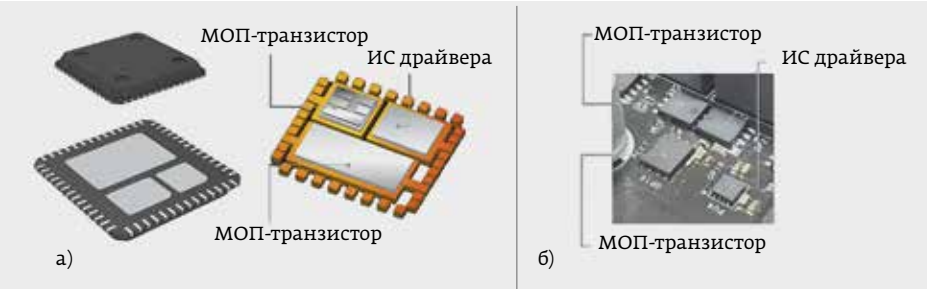

Рис. 10. DrMOS компании Intel (а) в сравнении со стандартным вариантом сборки (б)

для уменьшения индуктивности, а также LFPAK и LFPAK-i (рис. 9) для замены/совместимости с SO-8.

DrMOS от Intel

QFN-корпуса не рассматривались под полевые МОП-транзисторы, пока Intel не выпустил DrMOS – гибридную сборку ИС-драйвера и полевых МОП-транзисторов в едином корпусе QFN56 (рис. 10). DrMOS позволил улучшить массогабаритные характеристики и увеличить плотность энергопотребления.

Power-PAK и Polar-PAK от Vishay

Power-PAK – это корпуса для MOSFET компании Vishay: Power-PAK1212-8 и Power-PAK SO-8 (рис. 11). Корпус Polar-PAK является основным у Vishay (рис. 12), он уникальный – отводит тепло по обеим сторонам. Плотность рабочего тока увеличена вдвое по сравнению с SO-8.

DFN5 (SO-8FL) и WDFN8 от Onsemi

Это корпуса для МОП-транзистора с плоскими выводами под поверхностный монтаж для замены SO-8. DFN5 (SO-8FL) и WDFN8 (рис. 13) обладают низкими добротностью и емкостью и позволяют минимизировать потери на проводимость.

LFPAK и QFPAK от NXP

LFPAK считается самым надежным в мире из корпусов SO-8. Его верхний вывод монтируется непосредственно к кристаллу схемы и обеспечивает снижение электрического сопротивления и индуктивности стока, а нижний – это сток, обеспечивающий теплоотвод (рис. 14а). QFPAK обладает малыми габаритами и высокой эффективностью охлаждения. Стандартный SO-8 по сравнению с QFPAK занимает на ПП площадь 6,15×5,15 мм (рис. 14б), а тепловое сопротивление составляет 1,5 К/Вт.

Power 56 от Fairchild Semiconductor

Power 56 (рис. 15) – это улучшенный DFN 5×6 мм. Занимаемая корпусом площадь сравнима с TSOP-8, толщина

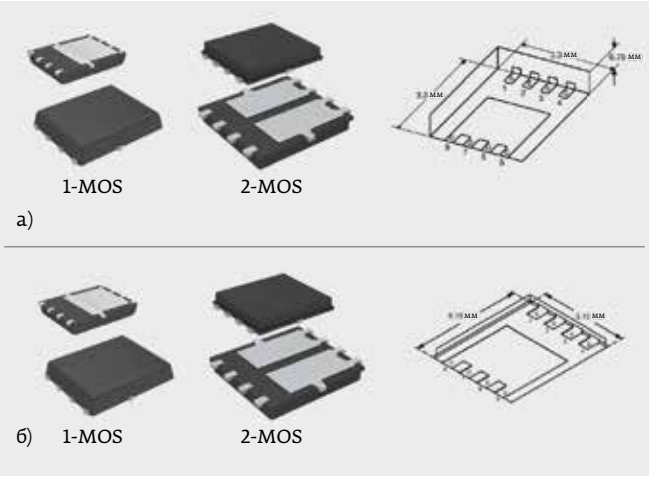

Рис. 11. Корпуса Power-PAK1212-8 (а) и Power-PAK SO-8 (б) компании Vishay

меньше, он имеет меньшее тепловое сопротивление, уменьшенную высоту сборки.

DirectFET от International Rectifier (IR)

Корпус DirectFET обеспечивает эффективное рассеивание тепла и схож с SO-8. Он широко применяется в производстве AC-DC- и DC-DC-преобразователей для бытовой электроники. Конструкция DirectFET (рис. 16) позволяет отводить тепло с двух сторон.

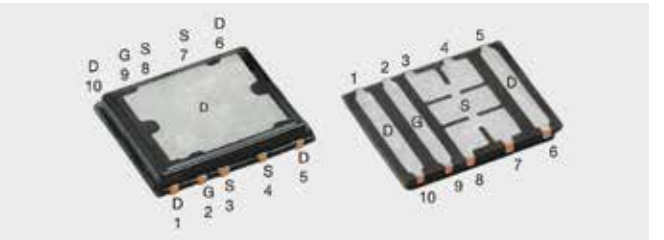

Рис. 12. Корпус Polar-PAK компании Vishay

Сток (D) и верхний теплоотвод – медная крышка, что позволяет сделать корпус малогабаритным.

ТЕНДЕНЦИИ СБОРКИ

По мере увеличения плотности тока постоянно совершенствуются и технологии сборки МОП-транзисторов с целью улучшения качества межсоединений, увеличения отвода тепла, снижения сопротивления и индуктивности, повышения термостабильности.

В стандартных сборках TO, D-PAK, SOT, SOP и др. (рис. 17) межсоединения делают проволочными.

Новые технологии с использованием медной ленты, заменяющей проволоку, позволили снизить термическое сопротивление на 10–20 %, а электрическое сопротивление соединения от контактов кристалла к корпусу/выводам – на 61 %.

Усовершенствованная компанией IR технология называется Cu-Strap, у Vishay – PowerConnect, у Fairchild – Wireless Package (рис. 18).

Одним из ключевых аспектов развития технологии стало обеспечение отвода тепла, решаемое за счет конструкционных особенностей, которые позволили увеличить площадь его рассеивания.

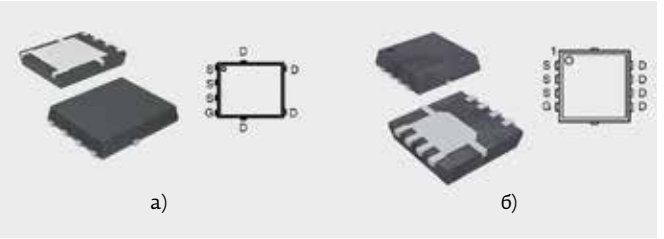

Рис. 13. Корпуса DFN5 (SO-8FL) (а) и WDFN8 (б) компании Onsemi

Рис. 14. Корпуса LFPAK (а) и QFPAK (б) компании NXP (размеры в мм)

***

Электронная промышленность продолжает развиваться в направлении уменьшения массогабаритных параметров микросхем. Для конечного потребителя при выборе МОП-транзистора важными являются требования к монтажу и электротехнические параметры.

На сегодняшний день практически все электронные системы зависят от размера ПП или подложки и толщины сборки.

Важными параметрами силовых МОП-транзисторов являются рабочая температура, а также напряжение сток-исток V_{DS}. МОП-транзистор должен выдерживать свои параметры по «абсолютному максимальному напряжению при 25 °C». Необходимо учитывать связь между напряжением

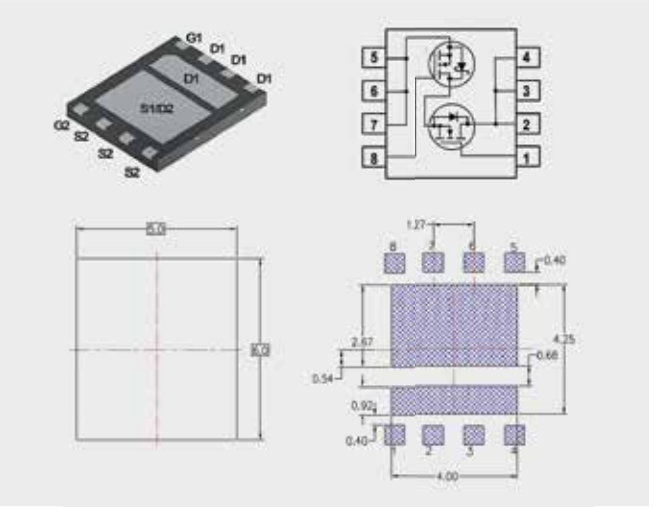

Рис. 15. Корпус Power 56 компании Fairchild Semiconductor (размеры в мм)

Рис. 16. Конструкция корпуса DirectFET компании International Rectifier

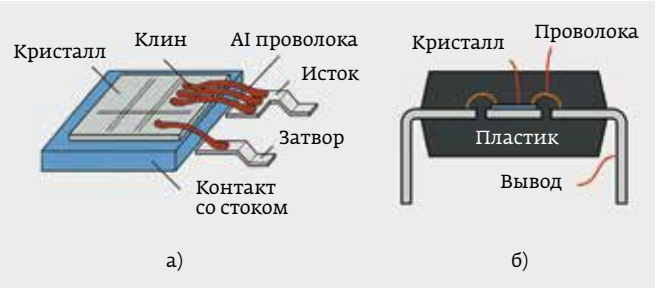

Рис. 17. Проволочная сварка межсоединений в корпусах типа TO, D-PAK, SOT (а) и SOP (б)

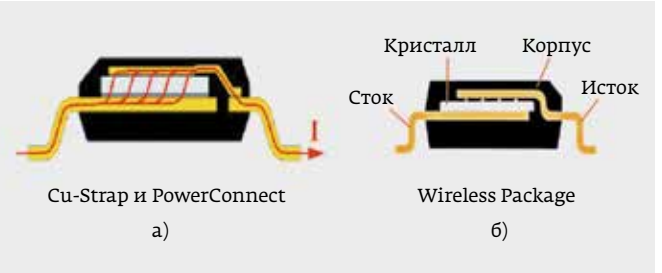

Рис. 18. Схемы сборки по технологиям компаний IR, Vishay (а) и Fairchild (б)

и температурой, и в спецификации должна быть таблица данных по «температурному коэффициенту (ТК) V_{DS}».

При высоких температурах ТК будет значительно изменять V_{DS}, поэтому для большинства МОП-транзисторов, согласно правилам проектирования, требуется коэффициент снижения рабочих значений тока от 10 до 20 %.

Также важна роль напряжения затвор-источник V_{GS}. Нельзя использовать большее V_{GS}, чем нужно для достижения номинального значения R_{ON}. Пиковое значение R_{ON} обычно указывается при 25 °C, при более высоких температурах оно возрастает на 30–150%.

На потери при переключении влияют два фактора – время преобразования энергии на включение и выключение МОП-транзистора и необходимость переключения энергии для зарядки емкости перехода C_J (затвор-исток) для каждого процесса.

Также следует обращать внимание на значения тока стока I_D (для температуры корпуса или температуры окружающей среды).

Рассеиваемая мощность зависит не только от температуры, но и от времени, что требует учета «термического насыщения».

Разработка МОП-транзистора состоит из шести шагов:

1. **Выбор n- или p-типа.** Когда МОП-транзистор подключен к земле, а нагрузка – к сетевому напряжению, он представляет собой силовой переключатель нижнего плеча. В этом случае используется n-тип, который должен отключать или включать напряжение устройства. Когда МОП-транзистор подключен к шине, а нагрузка к земле, то необходимо использовать силовой переключатель верхнего плеча – p-тип, который не зависит от напряжения.
2. **Определение номинального тока.** Номинальный ток должен выбираться таким, чтобы транзистор выдерживал максимальный ток.
3. **Определение потребностей в теплоотводе.** Нужно учитывать наихудший (брать для расчета) и реальный случаи.

Таблица 1. Классификация силовых элементов

Характеристика	Тип	Схема
Степень контроля по сигналу	Полууправляемый	Тринистор (SCR)
	Управляемый	Запираемый тиристор (GTO), большой транзистор (GTR), MOSFET, IGBT
	Неуправляемый	Силовой диод
Управляющий сигнал	По напряжению	IGBT, MOSFET, тиристор статической индукции (SIT)
	По току	SCR, GTO, GTR
Форма управляющего сигнала	Импульсный	SCR, GTO
	С электронным управлением	GTR, MOSFET, IGBT
Полярность	Биполярный	Силовой диод, SCR, GTO, GTR, биполярный транзистор со статической индукцией (BSIT), биполярный плоскостной транзистор (BJT)
	Униполярный	MOSFET, SIT
	Составной	МОП-управляемый тиристор (MCT), SIT, IGBT

Таблица 2. Преимущества и недостатки СЭ

Группа	Категория	Преимущества	Недостатки	Области применения
Силовые дискретные элементы	Силовой диод	• Простая схема; • простой принцип работы; • высокая надежность	• Способ коммутации задается общей схемой конечного устройства; • ограничение по высоким частотам	Промышленность и энергетика
	SCR	• Высокое выдерживаемое напряжение; • высокий допустимый ток	• Скорость переключения ниже, чем у MOSFET; • рабочие напряжение и ток ниже, чем у GTO	
	IGBT	• Высокая скорость переключения по напряжению с малыми потерями; • выдерживает воздействия импульсного тока	• Низкая скорость переключения по току; • высокий входной импеданс; • сложная схема	Серверы, телеком, потребительские и автомобильные схемы питания
	GTR	• Высокие выдерживаемое напряжение и допустимый ток; • хорошие характеристики переключения; • высокая пропускная способность; • низкое напряжение насыщения	• Очень маленький коэффициент усиления по току; • большой обратный импульсный ток затвора; • низкая частота переключения; • сложная схема	
	GTO	• Высокие рабочие напряжение и ток; • высокая пропускная способность при большом уровне мощности	• Низкое выдерживаемое напряжение; • низкий допустимый ток; • подходит для силовых устройств мощностью не более 10 кВт	
	MOSFET	• Высокая скорость переключения; • хорошая термостойкость; • малая требуемая управляющая мощность; • высокие рабочие частоты; • простая схема	• Низкое выдерживаемое напряжение; • низкий допустимый ток; • высокий входной импеданс; • подходит для силовых устройств мощностью не более 10 кВт	
Силовые интегральные схемы (ИС)		• Небольшие размеры; • малый вес; • небольшое количество выводов; • долгий срок службы; • высокая надежность; • оптимальные эксплуатационные характеристики; • низкая стоимость; • простота массового производства		Различные электронные приборы
Модули питания		Могут состоять из нескольких компонентов и выполнять различные функции		

Таблица 3. Три поколения полупроводниковых материалов

Полупроводниковые материалы		Ширина запрещенной зоны E_g (при температуре 300 K), эВ	Температура плавления $T_{плав.}$, °C	Основное применение
I поколение	Ge	0,67	937,5	Низковольтные, низкочастотные транзисторы и фотодетекторы средней мощности
	Si	1,11	1414,9	
II поколение	GaAs	1,424	1238	Микроволновые устройства мм-диапазона и светоизлучающие устройства
III поколение	SiC	2,36; 3,03; 3,28 – для разных типов кристаллической решетки	2730	• Высокотемпературные, высокочастотные, радиационно-стойкие устройства высокой мощности; • синие, зеленые и УФ-светодиоды; • полупроводниковые лазеры
	GaN	3,37	2500	
	AlN	6,2	2200	
	C	5,46–6,4	4600 при 10,8 МПа; не плавится при атмосферном давлении	
	ZnO	3,37	1975	

Таблица 4. Сравнение силовых элементов

Категория	Тиристоры	Транзисторы	MOSFET	IGBT
Тип управления	Импульсное	По току	По напряжению	По напряжению
Самовыключение	Коммутация выключения	Самовыключение	Самовыключение	Самовыключение
Рабочая частота	<1 кГц	<30 кГц	20 кГц – 1 МГц	<40 кГц
Управляющая мощность	Малая	Большая	Малая	Малая
Потери при переключении	Большие	Большие	Маленькие	Большие
Потери на электропроводность	Маленькие	Маленькие	Большие	Маленькие
Уровни по напряжению и току	Максимальные	Большие	Минимальные	Средние
Типовое применение	Индукционный нагрев	Инвертор ИБП	Импульсные источники питания	Инвертор ИБП
Стоимость	Минимальная	Низкая	Средняя	Высокая
Эффект модуляции проводимости	Есть	Есть	Нет	Есть

4. **Определение скорости переключения.** Наиболее важными являются переключения затвор-сток и затвор-исток, так как эти переключения происходят с потерями, а также емкость стока-истока. Чем меньше скорость переключения, тем ниже эффективность.
5. **Подбор корпуса.** Следует учесть, потребуется ли собственное производство или закупка корпусов либо выводных рамок. Здесь нужно учитывать права первичного разработчика.
6. **Определение технологии сборки.** Различные требования могут повлиять на подбор технологии сборки: от качественных и массогабаритных показателей до материалов и отработки процессов.

520
первоклассных специалистов в штате

2500
реализованных комплексных проектов

25 000
единиц инсталлированного оборудования

Остек-ЭК –
первый поставщик, о котором вы думаете,

...когда требуется оборудование для микроэлектронного производства

Умеем внедрять технологии независимо от того, что происходит в современном мире.

Оборудование

- для микросборки и корпусирования;
- для полупроводникового кристального производства.

ostec
группа компаний

Остек-ЭК
Оборудование и сервис для микроэлектронных производств
ostec-micro.ru | micro@ostec-group.ru | +7 (495) 788-44-42