

Силовые MOSFET: расширяем возможности

МАКСИМ СОЛОМАТИН, менеджер по бренду IR, «Компэл»

Силовые MOSFET — одни из самых востребованных в настоящее время ключевых элементов, используемых для преобразования электрической энергии. Они находят широкое применение в каскадах DC/DC-преобразователей, в коммутации и распределении цепей питания, управлении электроприводом и в цепях защиты. Основные параметры мощных МОП-транзисторов во многом определяют эффективность преобразования энергии в силовых приборах. Базовая технология MOSFET была разработана еще в 1970-х гг., однако поиск новых методов улучшения эффективности данного класса приборов продолжается.

Эволюция MOSFET происходит по двум направлениям — в сторону увеличения эффективности преобразования энергии и увеличения плотности мощности. Эффективность преобразования определяется уровнем потерь мощности на силовом ключе в процессе работы. Плотность мощности определяется отношением максимального коммутируемого тока, приведенного к корпусу или площади, которую корпус прибора занимает на плате. Ключевыми параметрами, определяющими эффективность работы MOSFET-транзисторов, являются: сопротивление в открытом состоянии $R_{ds(on)}$, максимальный ток через транзистор I_d и заряд затвора Q_g . Потери мощности определяются двумя составляющими: статической и динамической. Статические потери обусловлены падением напряжения на сопротивлении открытого канала. Динамические потери определяются характером переключения, влиянием паразитных составляющих, потерями в цепях управления по затвору.

Повышение плотности мощности определяется усовершенствованием структуры кристалла и технологии корпусирования. Эволюция развития транзистора от планарной до trench-технологии сопровождалась значительным сокращением площади кристалла, что привело к снижению сопротивления канала в открытом состоянии $R_{ds(on)}$. В свою очередь, уменьшение этого параметра отразилось на снижении потерь мощности и улучшении процесса рассеяния тепла, что позволило производителям повысить плотность мощности. У современных низковольтных MOSFET сопротивление открытого канала составляет менее 1 мОм. Эти приборы обеспечивают широкий токовый диапазон для различных приложений — от единиц до сотен ампер.

ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИЛОВЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

Для анализа работы полевых транзисторов существует множество моделей, и, тем не менее, соответствующее описание их работы затруднено. Большинство производителей полевых транзисторов предлагают для своих изделий модели Spice или Saber, но слишком мало говорят о ловушках, подстерегающих разработчика. Эти модели обеспечивают, как правило, несколько способов разрешения наиболее общих вопросов. Характеристики переключения транзисторов в реальной схеме существенно отличаются от тех, которые рассчитаны производителями по составным моделям. Причиной этого является недооценка или трудность учета дополнительных факторов, влияющих на поведение мощного МОП-транзистора в реальной схеме.

Кроме структуры и технологического процесса, по которому изготовлен прибор, на работу MOSFET в реальной схеме оказывают влияние и другие факторы:

- сопротивление корпуса;
- паразитные емкости и индуктивности межсоединений;
- топология проводников печатной платы.

При больших токах следует учитывать сопротивление корпуса и печатных дорожек. Медные проводники стандартной печатной платы имеют удельное сопротивление 0,5 мОм на квадрат. В отдельных случаях сопротивление канала MOSFET оказывается ниже сопротивления печатных дорожек. Возможно ли на практике обеспечить прохождение тока с такой плотностью в столь небольшом корпусе? Можно ли добиться того, чтобы сопротивления межсоединений «кристалл — выводы корпуса» и «выводы корпуса — контактные площадки печатной платы» были столь же низки? Необходимо также сохранить высокую частоту переключений транзистора. Что же на практике ограничивает скорость переключения силовых транзисторов?

Фактически, реальная скорость переключения также зависит от ряда других факторов. Например, от того, насколько быстро происходит управление цепями затвора с учетом паразитной индуктивности.

Для анализа поведения MOSFET в реальной схеме рассмотрим полумостовую схему, которая является наиболее типовой для силовой электроники. В частности, эта схема широко используется в синхронных понижающих конверторах.

ВЛИЯНИЕ ПАРАЗИТНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ ВЫВОДОВ КОРПУСА

Одним из основных паразитных элементов полевого транзистора, усложняющих и ухудшающих динамику переходных процессов в реальных схемах, является паразитная индуктивность выводов полевого транзистора. Она обусловлена двумя составляющими — индуктивностью сварных проволочек и индуктивностью металлических выводов рамки транзистора. Величина паразитной индуктивности выводов составляет 5...7 нГн.

Влияние паразитной индуктивности рассмотрим на примере типовой полумостовой схемы с MOSFET ключами (см. рис. 1). На эквивалентной схеме МОП-транзисторов показаны паразитные элементы — сопротивление и индуктивность выводов транзисторов, а также дорожек печатной платы и паяных межсоединений. Наличие индуктивности в цепи затвора приводит к задержке сигнала управления как при включении, так и при выключении транзистора. Поскольку оба ключа (верхний и нижний) под управлением драйвера должны переключаться синхронно, то неучтенная задержка включения и выключения может привести к возникновению сквозного тока через мост и выходу из строя силового прибора.

Задержка в сигнале управления увеличивает потери мощности в цепях управления полевого транзистора.

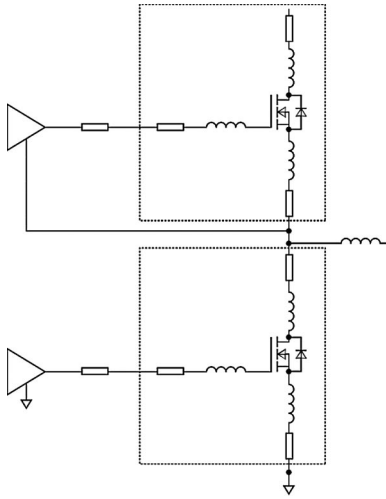


Рис. 1. Эквивалентная схема полумостового транзисторного каскада с учетом паразитных цепей

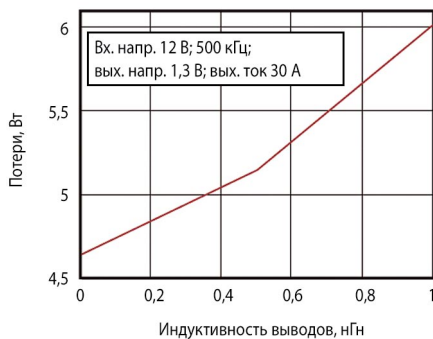


Рис. 2. Падение напряжения на CSI увеличивает потери мощности в цепях управления FET

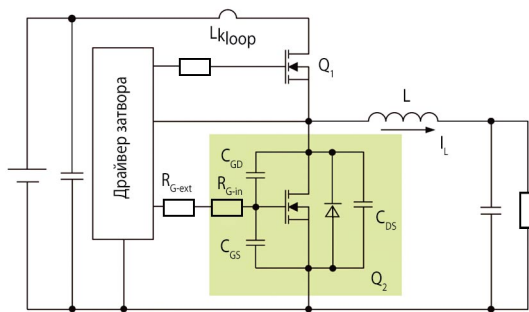


Рис. 3. Прохождение тока через емкость затвор-сток

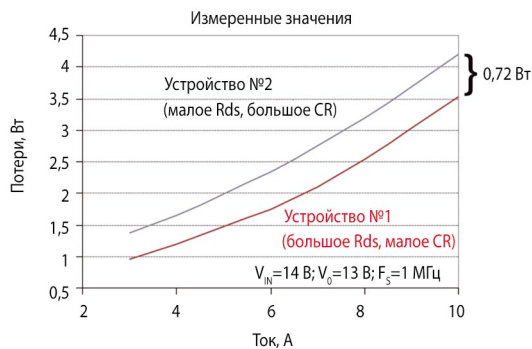


Рис. 4. Потери для двух различных типов МОП-транзисторов в нижнем плече схемы на рисунке 3 (транзистор Q2)

Таблица 1. Параметры двух транзисторов MOSFET

Транзистор	Rds, мОм	Qgs1, нКл	Qgd, нКл	CR (QGD/QGS1)	Vth, В
№1	5,38	8,81	8,59	0,98	2,02
№2	4,83	10,85	16,37	1,51	2,08

На рисунке 2 показана зависимость потери мощности от индуктивности выводов MOSFET в реальной схеме DC/DC-преобразователя со следующими параметрами: входное напряжение — 12 В; выходное — 1,3 В; частота преобразования — 500 кГц; выходной ток — 30 А.

Чем больше потери мощности, тем меньше эффективность преобразования энергии. Наличие индуктивности выводов может также привести к появлению выбросов напряжения. Если эти броски напряжения превысят предельно допустимые значения, прибор выйдет из строя.

Для устранения или уменьшения паразитной индуктивности рекомендуется использовать безвыводные корпуса типа DirectFET, а для уменьшения импеданса межсоединений — оптимальную топологию разводки. В отличие от стандартных корпусов, DirectFET не имеет ни развариваемых проводников, ни рамочных выводов.

ДЕМПФИРОВАНИЕ ИНДУЦИРОВАННОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ТРАНЗИСТОРА НИЖНЕГО ПЛЕЧА

Одной из основных проблем, с которой часто приходится сталкиваться разработчикам силовых преобразователей, является возникновение сквозного тока в полумостовых каскадах, вызванное ложным отпиранием транзистора нижнего плеча из-за емкости Миллера в структуре МОП-транзистора (сток-затвор). Большие частоты переключения с острыми фронтами приводят к увеличению динамического тока. При открывании транзистора верхнего плеча напряжение сток-исток противоположного транзистора уменьшается со скоростью dV_{ce}/dt . Фронт этого напряжения вызывает протекание тока через емкость Миллера, затворный резистор и выходной каскад драйвера, что создает падение напряжения на активном сопротивлении в цепи затвора. Если этот потенциал превысит пороговое напряжение на затворе, произойдет ложное открывание транзистора Q2 (см. рис. 3).

Простой математический анализ показывает, что для наилучшего решения этой проблемы следует, чтобы соотношение Q_{gd}/Q_{gs1} было меньше 1. Другими факторами предотвращения индуцированного включения являются низкий выходной импеданс цепей драйвера ($<1 \text{ Ом}$), низкое внутреннее сопротивление затвора транзистора R_g , включение внешнего форсирующего конденсатора GS и использование для транзистора Q2 типов корпусов с минимальными паразитными параметрами.

СОТНОШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ И СТАТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Показателем качества управляющего ключа синхронного выпрямителя DC/DC-преобразователя является произведение сопротивления открытого канала на заряд переключения — $R_{ds(on)} \cdot Q_{sw}$. Именно этой величине прямо пропорциональна основная доля потерь мощности.

Для лучшего понимания вклада паразитной емкости C_{dv}/dt в динамические потери рассмотрим два близких типа MOSFET, отличающихся, в основном, R_{ds} и отношением Q_{gd}/Q_{gs1} (см. табл. 1).

Транзистор №1 имеет высокое значение $R_{ds(on)}$ и низкое отношение CR, тогда как транзистор №2 имеет низкое значение $R_{ds(on)}$, но высокое отношение CR. Эти два транзистора были поочередно протестированы в схеме синхронного понижающего преобразователя (см. рис. 3). Транзисторы устанавливались на месте Q2, транзистор Q1 был того же типа. Частота преобразования конвертора — 1 МГц. Входное напряжение — 14 В, а выходное — 1,3 В. Измеренные потери для двух различных типов транзисторов показаны на рисунке 4.

Как показано на этом рисунке, транзистор №1 имеет меньшие потери по сравнению с транзистором №2 в широком диапазоне нагрузок. Фактически, при токе

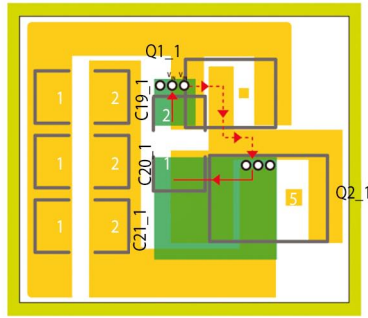
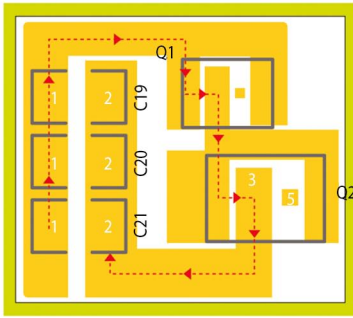


Рис. 5. Длина входных цепей должна быть минимальной

нагрузки 10 А потери мощности на транзисторе №1 на 0,72 Вт меньше, чем у транзистора №2. В целом, потери прибора №2 на 18% больше чем у прибора №1, которые в основном обусловлены вкладом составляющей Cdv/dt (динамические потери при включении). Секрет состоит в том, что транзистор №1 имеет меньшее значение Qgd и отношение CR и, следовательно, он обеспечивает меньшие потери Cdv/dt .

ВЛИЯНИЕ ТОПОЛОГИИ РАЗВОДКИ

Разводка цепей на печатной плате является другим важным фактором, определяющим производительность MOSFET в силовой схеме. Например, плохая или неудачная разводка печатных дорожек может добавить паразитные индуктивности и сопротивления, которые приведут к увеличению динамических потерь и потерь на проводимость. В результате вырастет уровень ЭМИ.

Для уменьшения влияния топологии разводки разработчик должен стремиться к тому, чтобы площадь входных цепей была как можно меньше, и размещать драйвер и MOSFET как можно ближе друг к другу (см. рис. 5).

На правой части рисунка для уменьшения площади входных цепей использованы проходные керамические конденсаторы малого размера, размещенные под транзистором, и переходные отверстия. Следовательно, необходимо помещать проходные конденсаторы после выхода драйвера как можно ближе к затвору MOSFET. В данном случае, организация цепей управления транзистором Q1 имеет больший приоритет, чем цепей Q2.

При параллельном соединении полевых транзисторов следует обеспечить согласование импеданса затворных цепей. Дополнительно, при разводке печатных дорожек требуется использовать отдельные проводники аналоговой и силовой земли, чтобы локализовать прохождение больших токов по заданным

направлениям и исключить влияние на чувствительные входные цепи. Эти две земли необходимо соединить на печатной плате только в одной точке. В разводке следует использовать множество переходных отверстий для соединения МОП-транзистора с цепями питания V_{in} или землей. Любые неиспользуемые площади на печатной плате должны быть покрыты медным слоем.

ТЕХНОЛОГИЯ КОРПУСИРОВАНИЯ — КЛЮЧЕВОЙ ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ MOSFET

Рост эффективности корпусов силовых МОП-транзисторов для поверхностного монтажа до настоящего времени обеспечивался эволюционным развитием уже известных основных типов корпусов по двум основным направлениям. Первое из них — разработка на базе корпуса SO-8. Второе — разработка приборов с многорядным расположением шариковых контактов в корпусах типа BGA или в бескорпусных FlipChip.

Снижение активного сопротивления и улучшение теплопередачи вариантов корпуса SO-8 достигалось за счет увеличения количества развариваемых к выводам и кристаллу проволок из золота или алюминия. Им на смену пришло крепление кристалла медными зажимами-клипсами, что попутно улучшило отвод тепла к утолщенным выводам корпуса, дополнительно рассеивающим тепло.

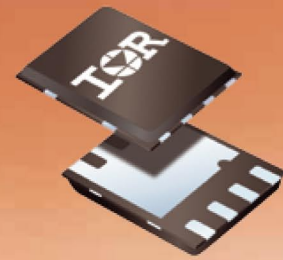
За последние несколько лет ведущие производители MOSFET произвели существенные улучшения в корпусировании транзисторов, сохранив при этом низкие сопротивления во включенном состоянии и минимизировав паразитные параметры.

КОРПУС D2PAK-7

Корпус D2PAK (TO-263) был разработан более 10 лет назад. Он используется многими производителями для корпусирования мощных MOSFET с токами до 100 А и более. Соединение контактов

Эталонные MOSFET

MOSFET 40В-250В
в силовом PQFN корпусе



Со стандартным управлением затвором

Наименование	V_{ds} , В	I_D , А	$R_{\theta(sj)}$ @10 В, МОм	Q_g , нКл
IRFH5004TRPBF	40	100	2.6	73
IRFH5006TRPBF	60	100	4.1	67
IRFH5007TRPBF	75	100	5.9	65
IRFH5010TRPBF	100	100	9.0	65
IRFH5015TRPBF	150	56	31	33
IRFH5020TRPBF	200	41	59	36
IRFH5025TRPBF	250	32	100	37

*Также доступны с логическим уровнем управления затвором

Особенности:

- Малое термосопротивление
- Большой ток корпуса – до 100А в непрерывном режиме
- Стандартное расположение выводов

ЛУЧШИЕ
в отрасли

Компэл
www.compel.ru

Москва Тел.: (495) 995-0901 E-mail: msk@compel.ru
Санкт-Петербург Тел.: (812) 327-9404 E-mail: spb@compel.ru

International
Rectifier
THE POWER MANAGEMENT LEADER



Рис. 6. Новый корпус обеспечивает удвоение токовой нагрузочной способности до двух раз

затвора и истока кристалла с выводами рамки корпуса производится алюминиевыми проволоками диаметром около 250 мкм. Стоковый контакт кристалла посажен через эвтектику на массивную металлическую площадку выводной рамки. Для уменьшения сопротивления соединения истока оно выполнено тремя проволоками. Основная цель модифицированного корпуса D2PAK-7, выпущенного компанией International Rectifier — увеличение нагрузочной токовой способности корпуса за счет уменьшения сопротивления между контактами истока кристалла и выводной рамкой. Кристалл транзистора при этом не подвергался модификации под новый корпус. С этой целью истоковые контакты на кристалле соединены четырьмя проволоками с двумя гребенками контактов — на два и три контакта (см. рис. 6).

Благодаря этому удалось уменьшить сопротивление $R_{ds(on)}$ на 0,4 мОм по сравнению с обычным трехвыводным корпусом D2PAK. Использование дополнительных выводов рамки для цепи истока также улучшило теплопередачу. При этом увеличилась и нагрузочная токовая способность корпуса.

В таблице 2 представлены базовые параметры MOSFET в модифицированных корпусах D-PAK-7 компании IR. Можно отметить значительное уменьшение сопротивления открытого канала $R_{ds(on)}$ и увеличение максимального тока I_d . Новая технологии корпусирования позволила значительно увеличить плотность мощности полевых транзисторов. Однако паразитные индуктивности выводов для корпуса D-PAK-7 сохранились на прежнем уровне.

КОРПУС DIRECTFET

Технология корпусирования DirectFET компании IR стала первой, которая обеспечила прорыв на пути дости-

Таблица 2. HEXFET N-канальные MOSFET-транзисторы в 7-выводном корпусе D2-PAK

Тип	VDS, В	$R_{ds(on)}$ @ 10 В, мОм	ID @ TC = 25°C, А	Qg, нКл
IRF1324S-7P	24	1,0	429	180,0
IRF2804S-7P	40	1,6	320	170,0
IRFS3004-7P	40	1,25	400	160,0
IRLS3034-7P	40	1,4	380	120,0
IRF1405ZS-7P	55	4,9	150	150,0
IRF3805S-7P	55	2,6	240	130,0
IRLS3036-7P	60	1,9	300	110,0
IRFS3006-7P	60	2,1	293	200,0
IRF2907ZS-7P	75	3,8	160	170,0
IRFS3107-7P	75	2,6	260	160,0
IRLS4030-7P	100	3,9	190	93,0
IRFS4010-7P	100	4,0	190	150,0
IRFS4115-7P	150	11,8	105	73,0

жения рекордно высоких показателей эффективности корпуса. Внешний вид и поперечный разрез прибора DirectFET представлены на рисунке 7.

Кристалл имеет двустороннее расположение выводов. На его нижней стороне расположены металлизированные контакты: два контакта истока и один — затвора. Контакт стока на второй поверхности кристалла соединен с медным корпусом-кожухом. Кристалл крепится к корпусу с помощью специального компаунда. Электрический контакт с печатной платой обеспечивается пайкой двух контактов истока, контакта затвора и двух контактов корпуса (отбортовки на корпусе). В транзисторах DirectFET электрический ток протекает по кратчайшему расстоянию — через кристалл и крышку корпуса. У транзисторов в корпусе SO-8, D-Pak и в разновидностях корпусов на их основе ток, кроме того, протекает через проволоки разварки кристалла и выво-

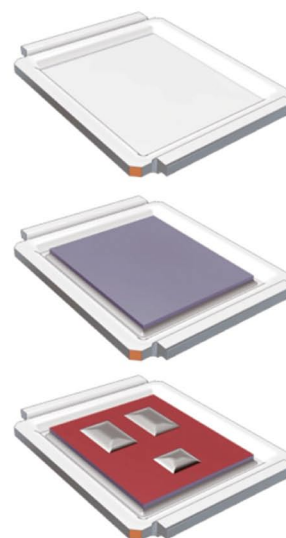
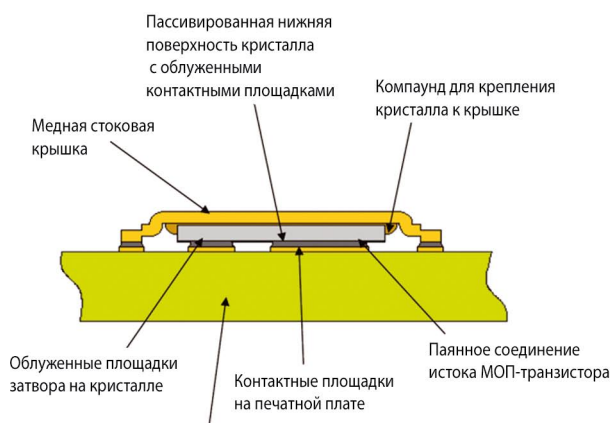


Рис. 7. Корпус типа DirectFET обеспечивает минимальное сопротивление выводов и паразитную индуктивность

ды корпуса. Электрическое сопротивление корпуса DirectFET около 0,1 мОм. Это значение в 14 раз ниже, чем аналогичный параметр у классического корпуса SO-8. Оно гораздо ниже электрического сопротивления кристалла при открытом канале.

Разработанный компанией International Rectifier корпус нового поколения для поверхностного монтажа обеспечивает эффективный отвод тепла от кристалла мощного MOSFET за счет двухстороннего охлаждения кристалла. У транзисторов в корпусах DirectFET термосопротивление «кристалл — печатная плата» составляет всего 1°C/Вт, а термосопротивление «кристалл — поверхность корпуса» — 3°C/Вт. Благодаря низкому термосопротивлению корпуса DirectFET способны рассеивать гораздо более высокую мощность, чем корпуса для поверхностного монтажа других типов. Это позволило, по крайней мере, удвоить номинальный ток транзистора, сохранив размеры как кристалла, так и корпуса. Отсутствие проволочек разварки и рамочных выводов с прямым монтажом кристалла на печатную плату предельно снизило сопротивление контактов и паразитные индуктивности выводов. Простота топологии монтажа печатной платы также способствует уменьшению паразитных индуктивностей.

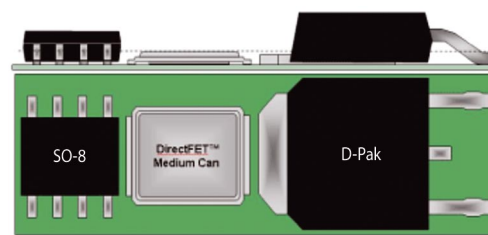
КЛАССИФИКАЦИЯ КОРПУСОВ DIRECTFET

Для оптимизации и согласования с током и сопротивлением канала транзистора разработаны три группы стандартных типов корпусов DirectFET, отличающихся размером крышки (Can): Small (малые), Medium (средние) и Large (большие). В каждой из групп существуют различные модификации в зависимости от размера кристалла, расположения и числа контактных площадок. На рисунке 8 представлено сравнение размеров корпусов SO-8, DirectFET типоразмера M (средний типоразмер) и D-Pak.

Все типы корпусов DirectFET имеют одинаковую и минимальную среди корпусов для поверхностного монтажа высоту 0,7 мм. Номенклатура выпускающихся транзисторов в корпусах DirectFET компании IR перекрывает диапазон напряжений 20...250 В.

В таблице 3 приведены параметры N-канальных HEXFET-транзисторов International Rectifier в корпусах DirectFET.

Применение транзисторов в корпусах DirectFET дает возможность заменить до трех параллельно включенных транзисторов в корпусе SO-8 или до двух транзисторов



5,6,2x1,78 (0,082 г) 31 мм ² 55,2 мм ³	5,05x6,35x0,70 (0,085 г) 32,1 мм ² 22,4 мм ³	6,73x10,42x2,38 (0,325 г) 70,1 мм ² 166 мм ³
---	---	---

Рис. 8. Соотношение размеров корпусов для поверхностного монтажа

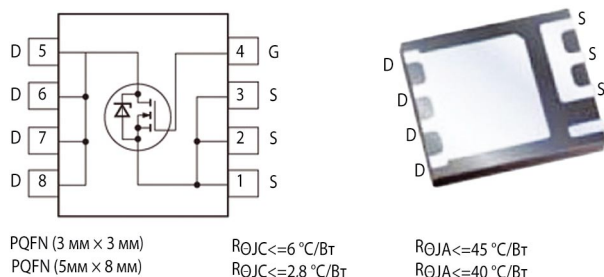


Рис. 9. Корпус типоразмера 5x6 мм занимает точно такую же площадь и использует то же посадочное место, что и корпус SO-8

в корпусе D-Pak, вдвое поднять объемную плотность энергии, резко снизить температуру в преобразователе. Ультразвук сопротивления открытого канала и низкий заряд затвора обеспечивают КПД преобразования выше 90% в одно- и многофазных DC/DC-преобразователях, применяемых в компьютерной технике.

КОРПУС PQFN

Транзисторы в корпусе PQFN (силовой QFN) занимают промежуточное положение по эффективности между транзисторами в стандартных корпусах DPAK, SO-8 и в корпусах DirectFET. Корпус PQFN (см. рис. 9) занимает такую же площадь, как и SO-8, но имеет ряд преимуществ.

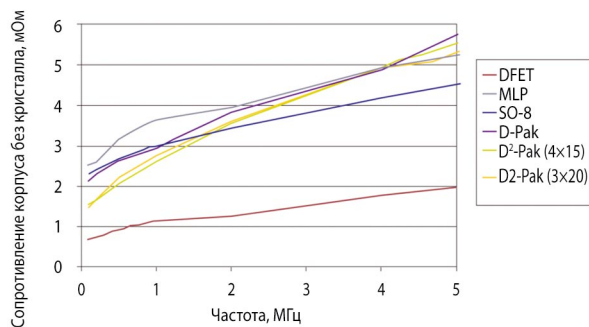
Расположение выводов для этих двух корпусов идентичное, что обеспечивает применение транзистора в кор-

Таблица 3. N-канальные HEXFET-транзисторы в корпусах DirectFET

Транзистор	V _{ds} , В	R _{ds(on)} Max 10 В, мОм	I _D @ T _A = 25°C, А	Q _g , нКл
IRF6691	20	1,8	32,0	47,0
IRF6718L2	25	0,70	61,0	—
IRF6717M	25	1,25	38,0	46,0
IRF6727M	30	1,7	32,0	49,0
IRF6726M	30	1,7	32,0	51,0
IRF7739	40	1,0	46,0	220,0
IRF7749L2	60	1,5	33,0	200,0
IRF7759L2	75	2,3	26,0	200,0
IRF6646	80	9,5	12,0	36,0
IRF7769L2	100	3,5	20,0	200,0
IRF7779L2	150	11,0	11,0	97,0
IRF6641	200	59,9	4,6	34,0
IRF7799L2	250	32	6,6	110,0

Таблица 4. N-канальные HEXFET-транзисторы IR в корпусах PQFN

Транзистор	Типы корпусов	V _{DS} , В	R _{DS(on)} Max 10 В, мОм	I _D @ T _C = 25°C, А	Q _g , нКл
IRLH56242	PQFN 2x2	20		22	14,0
IRFH5250	PQFN 5x6 B	25	1,15	45	52,0
IRFH5302	PQFN 5x6 B	30	2,1	100	29,0
IRFH5300	PQFN 5x6 B	30	1,4		50,0
IRLH5034	PQFN 5x6 B	40	2,4	100	82,0
IRLH5036	PQFN 5x6 B	60	4,4	100	44,0
IRFH5007	PQFN 5x6 B	75	5,9	100	65,0
IRFH5010	PQFN 5x6 B	100	9,0	100	65,0
IRFH5015	PQFN 5x6 B	150	31,0	56	33,0
IRFH5020	PQFN 5x6 B	200	55,0	43	36,0
IRFH5025	PQFN 5x6 B	250	100,0	32	37,0



Примечание: для корпуса DirectFET учтены также пайка и сопротивления дорожек на печатной плате под корпусом

Рис. 10. Зависимость сопротивления различных типов корпусов от частоты

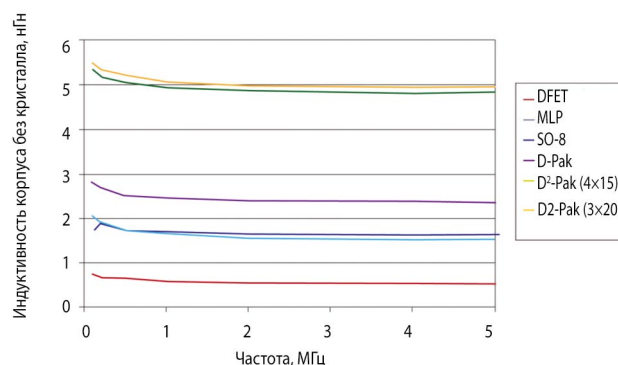


Рис. 11. Зависимость паразитной индуктивности корпуса от частоты

пусе PQFN в качестве альтернативной замены SO-8. В нем можно разместить более крупный кристалл. Выводы стока и истока имеют большую площадь. Термосопротивление между кристаллом и выводами существенно ниже, чем у SO-8 (2,8°C/Вт). По этой причине транзисторы в данном корпусе можно использовать в преобразовательных устройствах с более высокими характеристиками, чем в случае транзисторов в корпусе SO-8 и с более низкой ценой по сравнению с DirectFET. В таблицах 4 и 5 представлены параметры HEXFET N- и P-канальных транзисторов International Rectifier в корпусах PQFN.

ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ПАРАЗИТНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ КОРПУСА ОТ ЧАСТОТЫ

Измеренные зависимости сопротивления и паразитной индуктивности от частоты для различных типов MOSFET-корпусов показаны на рисунках 10 и 11.

Из приведенных рисунков видно, что корпуса DirectFET вносят совсем незначительный вклад в паразитное сопротивление и индуктивность по сравнению с другими корпусами. Кроме того, вариации паразитных параметров DirectFET минимально зависят от частоты по сравнению с указанными корпусами, поскольку индуктивность и сопротивление корпуса сведено к минимуму.

Последние модернизации корпусов DirectFET позволили уменьшить его сопротивление до 0,15 мОм, а паразитную индуктивность — до менее чем 0,1 нГн. Среди других корпусов ближе всех по данным показателям к DirectFET является корпуса серии MLP, представляющие собой разновидность корпусов PQFN.

ЭФФЕКТИВНЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ MOSFET

Топология понижающего DC/DC-преобразователя с синхронным выпрямлением требует применения полумостового коммутатора, в нижнем плече которого преобладают потери проводимости, а в верхнем — динамические потери коммутации. Динамические потери тем выше, чем выше частота коммутации. Т.е. для верхнего плеча требуется ключ с минимальным RDS(ON), а для нижнего плеча — с минимальным QG. Новые технологии компании International Rectifier позволяют ей производить MOSFET с улучшенными рабочими характеристиками, благодаря чему в полумостовых каскадах применяются транзи-

сторы одного типа с сохранением высокого уровня его эффективности. Малые значения QG обеспечивают низкое электропотребление AC/DC-преобразователей в дежурном режиме. Все перечисленные преимущества DirectFET далеко не исчерпывают возможности новой технологии корпусирования. В новом типе корпуса возможна также реализация целого ряда других силовых приборов, например, ультрабыстрых диодов, диодов Шоттки с возможностью достижения нового уровня характеристик.

Для большинства применений повышенная плотность мощности увеличивает гибкость выбора конструктивных решений. Например, в схемах, где требуется использование параллельных MOSFET для перераспределения тока, транзисторы с более высоким током позволяют снизить общее число используемых компонентов и стоимость изделия, поскольку меньшее число полевых транзисторов пропускает ток той же величины. Поэтому увеличение плотности мощности и возможности работать на высоких токах позволяет использовать полевые транзисторы в более сложных условиях эксплуатации, где требуется большой запас «выносливости» при возникновении нежелательных переходных процессов.

Благодаря компактности и ультранизким потерям перечень приложений транзисторов DirectFET постоянно расширяется. Помимо уже перечисленных приложений DirectFET нашли применение в высококачественных усилителях звука, в инверторах солнечных батарей, приводах с батарейным питанием, применяемых в электроинструментах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Eric Persson. What really limits MOSFET performance: Silicon, package, driver or circuit board?//International Rectifier Corp. EE Times.
2. В. Башкиров. DirectFET — прорыв в технологии корпусирования мощных полевых транзисторов//Компоненты и технологии. №5. 2002.
3. В. Башкиров. Новые семейства высокоэффективных низковольтных MOSFET//Новости электроники.
4. А. Никитин. Преимущества транзисторов в корпусах DirectFET//Новости электроники. № 7. 2010.
5. DirectFET Technology Board Mounting Application Note//Документ an-1035 компании International Rectifier.
6. А. Павленко. Монтаж корпуса DirectFet//Силовая электроника. №4. 2008.

Таблица 5. P-канальные HEXFET в корпусах PQFN

Транзистор	Тип, размер корпуса	VDS, В	RDS(on) Max 10 В, мОм	ID @ TC = 25°C, А	Qg, нКл
IRFHS9301	PQFN 2x2	-30	37,0	13	6,9
IRFHM9331	PQFN 3x3	-30	14,6	24	16,0
IRFH9310	PQFN 5x6 В	-30	4,6	40	58,0