

DirectFET – прорыв в технологии корпусирования мощных полевых транзисторов

Многофазные понижающие DC/DC-конвертеры, применяемые в вычислительной технике, стали в последние годы тем объектом, где выясняется подлинная эффективность современных мощных полевых транзисторов. Для их создания привлекаются все новейшие достижения в технологиях производства кристаллов и корпусирования, управления ключевыми элементами и схемотехнике. Стремительное приближение потребляемого ядром процессоров новейших поколений тока к отметке 100 А, снижения напряжения питания до субвольтового диапазона при требованиях сохранения эффективности, объема и цены непрерывно повышает сложность решаемых задач при проектировании конвертора.

Владимир Башкиров

irmoscow@online.ru

Достаточно сказать, что уровень рассеиваемой в единице объема VRM модуля мощности с 1997 года вырос более чем в 5 раз. Недостаточно высокий форм-фактор и повышенное тепловыделение вычислительных устройств создают серьезные проблемы для конечных потребителей. Особенно остро это ощущают на себе крупные интернет-провайдеры, которые из-за больших размеров и высокого тепловыделения серверов вынуждены считаться с высокими расходами на аренду и кондиционирование. Потребностью сегодняшнего дня становятся вычислительные средства нового поколения — компактные, низкопрофильные, с низким тепловыделением, такие как blade-серверы встраиваемого исполнения.

Компания International Rectifier реализует комплексную многоэтапную программу по разработке элементной базы для DC/DC-конвертеров новых поколений. Она охватывает все проблемы связанные с созданием этих конвертеров — от разработки новых технологий производства кристаллов до внедрения высокоэффективных топологий конвертора.

Особенности конструкции и преимущества DirectFET

Высокоэффективный корпус транзистора является важнейшим звеном эффективности как транзис-

тора так и ключевого каскада конвертора. Именно он позволяет в полной мере реализовать преимущества кристаллов транзисторов, производимых по новым технологиям, такой как, например, StripeTrench компании International Rectifier, имеющей преимущество в десятки процентов перед аналогами по потерям и плотности структуры.

Показателями эффективности корпуса являются компактность, низкое активное сопротивление выводов, низкое тепловое сопротивление и низкий уровень паразитных факторов. К этому же надо добавить максимальную площадь электрического и теплового контакта с печатной платой и топологию выводов, обеспечивающую простоту параллельного соединения прибором.

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 различных вариантов корпусов на базе корпуса SO-8. Второе направление — разработка вариантов приборов с многорядным расположением шариковых контактов в корпусах типа BGA или бескорпусных FlipChip.

Снижение размеров корпуса и улучшение тепловых характеристик полупроводникового прибора на-

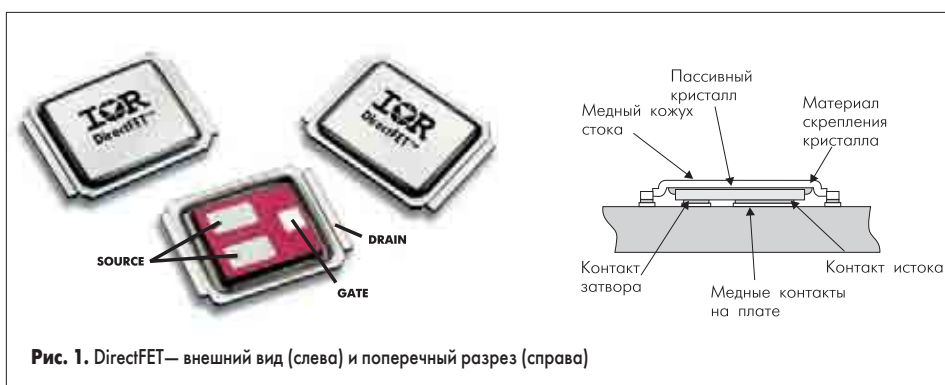


Рис. 1. DirectFET— внешний вид (слева) и поперечный разрез (справа)

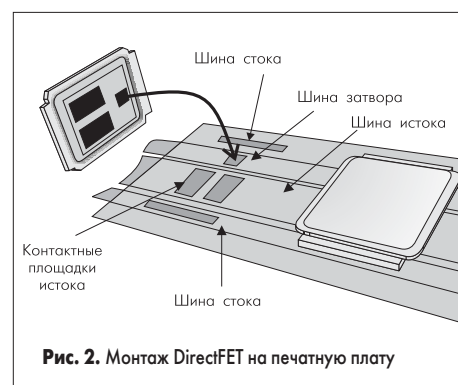


Рис. 2. Монтаж DirectFET на печатную плату

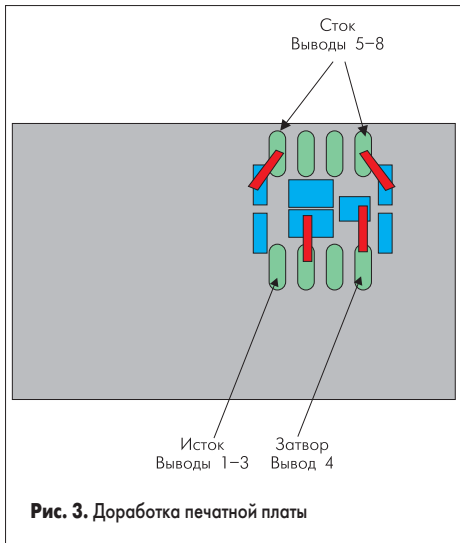


Рис. 3. Доработка печатной платы

прямо связано с повышением отношения площади кристалла к площади основания корпуса.

Улучшение этого показателя на обоих направлениях развития шло по пути интеграции кристаллов в одном корпусе, то есть по пути создания мультичиповых приборов. Сначала появились сдвоенные транзисторы в корпусе SO-8 и был достигнут уровень отношения 40 %, затем приборы Dual Fetky (к двум кристаллам транзисторов добавлен кристалл диода Шоттки) с уровнем отношения 45–50 % и, наконец, Leadless («безвыводной») SO-8 с уровнем отношения 60 %. На этом же уровне находятся современные разработки приборов в корпусах BGA. Исключение конечно составляют приборы типа FlipChip (у IR серия МОП-транзисторов такого типа получила название FlipFET), где достигнут уровень 100 % по причине отсутствия корпуса как такового.

Снижение активного сопротивления и улучшение теплопередачи вариантов корпуса SO-8 шло вначале по пути увеличения количества развариваемых к выводам и кристаллу проволок из золота или алюминия. Затем на смену им пришло крепление кристалла медными зажимами-клипсами, что попутно позволило улучшить отвод тепла к усиленным выводам корпуса, дополнительно рассеивающим тепло (корпуса CopperStrap у IR), и корпуса Bottomless SO-8 (Fairchild) с улучшенной передачей тепла на печатную плату через нижнюю поверхность корпуса.

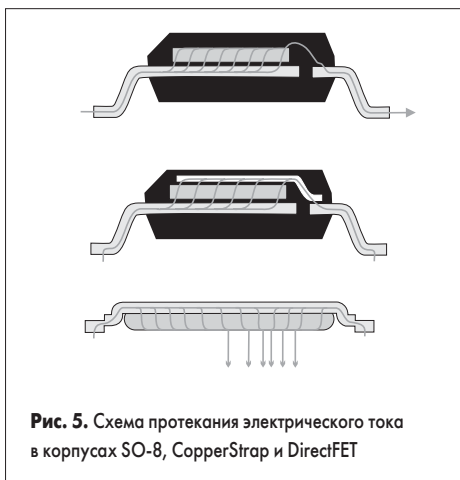


Рис. 5. Схема протекания электрического тока в корпусах SO-8, CopperStrap и DirectFET

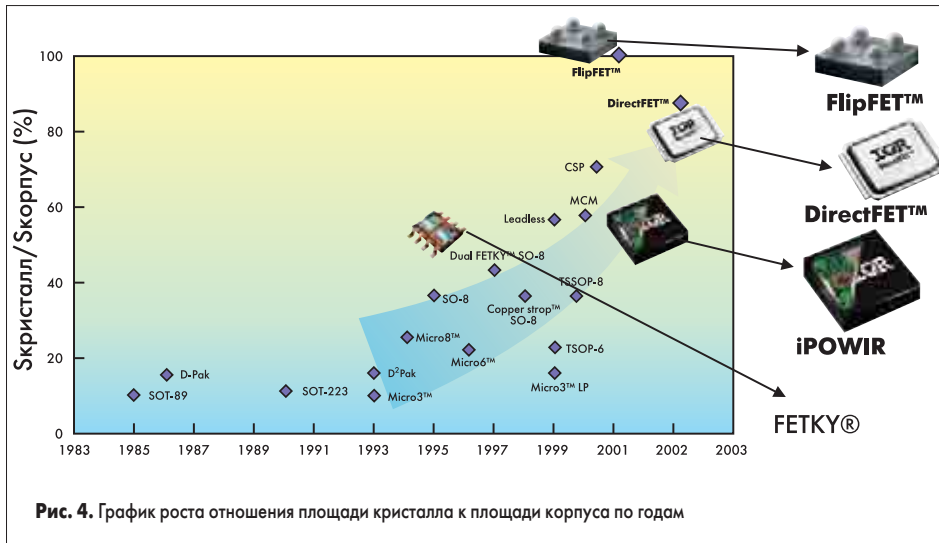


Рис. 4. График роста отношения площади кристалла к площади корпуса по годам

В BGA-корпусах, где и тепло, и электрический ток передается через шариковые контакты, эта проблема решалась путем параллельного соединения контактов.

Возможности повышения эффективности корпусов при применении перечисленных приемов ограничены размерами контактных площадок кристалла при разварке или зажиме, контактной площадью выводов и высотой корпуса. До настоящего времени не было предложено ни одной конструкции, которая бы кардинально изменила картину.

Технология корпусирования DirectFET компании IR стала первой, которая обеспечила прорыв на пути достижения рекордно высоких показателей эффективности корпуса.

Речь идет по существу о создании первого корпуса, который является подлинным корпусом силового транзистора.

Внешний вид и поперечный разрез прибора DirectFET представлены на рис. 1. Пассивированный кристалл имеет двустороннее расположение выводов. На нижней стороне кристалла 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).

Пассивация кристалла обеспечивает изоляцию выводов друг от друга и защиту кристалла от воздействия влажности.

На печатной плате корпус DirectFET занимает такую же площадь, как корпус SO-8.

Удобство монтажа

Конструкция DirectFET обеспечивает максимальную простоту монтажа (рис. 2).

В отличие от разработанных ранее типов корпусов для поверхностного монтажа взаимное расположение выводов DirectFET позволяет выполнить конструкцию проводников на печатной плате в виде 4 параллельных шин, на которые удобно монтируются корпуса при параллельном соединении. Простота топологии печатной платы обеспечивает минимальный уровень паразитной индуктивности. Большие размеры контактных площадок истока (2 по 1,8 × 1 мм), стока (2 по 0,4 × 3,9 мм)

и затвора (0,8 × 0,5 мм), расстояния между ними (более 0,6 мм) и допуска на посадку дают возможность использовать все материалы и технологии производства и монтажа печатных плат. За счет большой площади контакта и взаимного расположения контактных площадок достигается высокая механическая прочность соединения корпуса с платой, улучшенная электрическая и тепловая проводимость с корпуса на плату. Конструкция корпуса обеспечивает также минимальный уровень доработок печатной платы при переходе с корпуса SO-8 на корпус DirectFET (рис. 3). Для этого устанавливаются перемычки минимальной длины (красный цвет) между контактными площадками под корпус SO-8 (зеленый цвет) и дополнительными контактными площадками под корпус DirectFET (голубой цвет).

Рекордно высокое отношение площади кристалла к площади корпуса

В силу особенностей конструкции приборы DirectFET достигли уровня отношения площади кристалла к площади корпуса порядка 90 % (рис. 4).

Это на 30–40 % выше, чем лучшие достигнутые показатели у вариантов корпусов SO-8 и BGA. Это также на 20–25 % выше, чем у корпусов типа ChipScale (корпус размером с кристалл), считавшихся до этого эталоном по этому показателю.

Фактически DirectFET уступает здесь только приборам FlipFET, которые, однако, он превосходит по ряду других показателей.

Высокая электрическая и тепловая проводимость

Помимо того что корпуса DirectFET имеют большую площадь контактов истока и стока, они обладают еще рядом преимуществ по отношению к существующим корпусам приборов. У DirectFET отсутствуют дополнительные проводники электрического тока и тепла (проволока, зажимы, шариковые контакты), создающие добавочное электрическое и термосопротивление. Сам корпус у него является отличным проводником тепла и электрического тока.

Кроме того, высота корпуса DirectFET значительно меньше, чем у классического корпуса SO-8 и всех его модификаций, что еще более сокращает дистанцию от кристал-

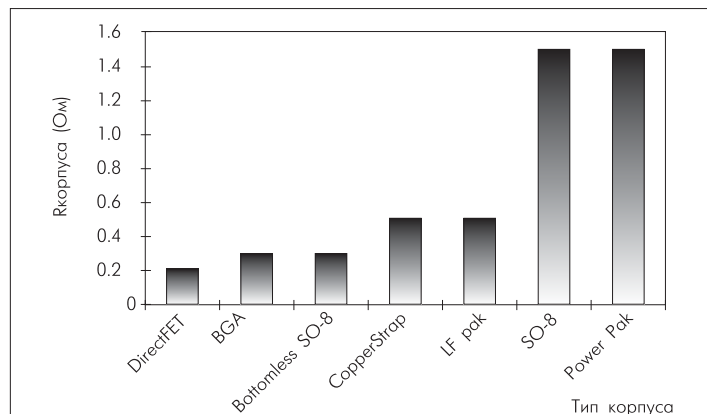


Рис. 6. Сравнение электрического сопротивления корпусов поверхностного монтажа

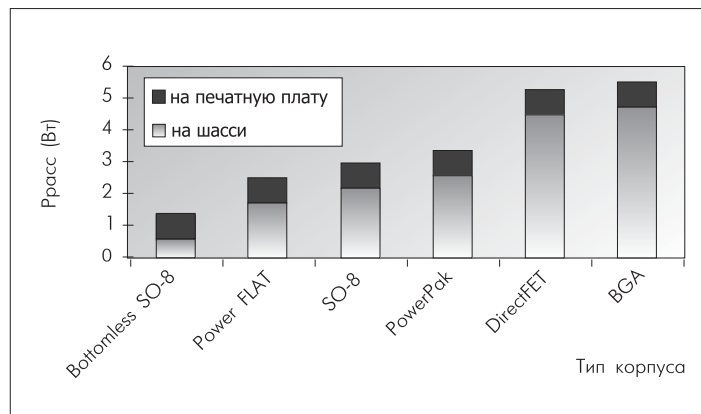


Рис. 8. Сравнение рассеиваемой мощности корпусов поверхностного монтажа

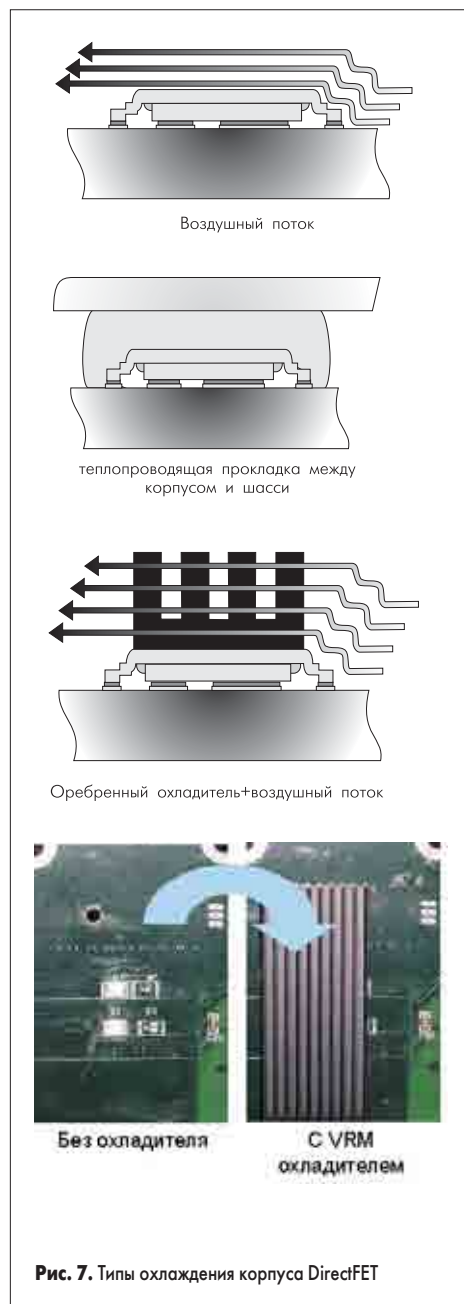


Рис. 7. Типы охлаждения корпуса DirectFET

ла до контакта на плате. Она составляет всего 0,7 мм вместо 1,75 мм (рис. 5), что обеспечивает кратчайший путь для передачи тепла и электрического тока. Следствием этого является рекордно низкое электрическое сопротивление корпуса DirectFET — всего 0,2 мОм (рис. 6).

Этот показатель более чем в 7 раз ниже, чем у корпуса SO-8, в 2,5 раза ниже, чем у корпуса CopperStrap, и в 1,5 раза ниже, чем у Bottomless SO-8 и более крупных BGA.

Тепловые сопротивления кристалл-корпус и кристалл-печатная плата у корпуса SO-8 составляют соответственно 25 °C/Вт и 20 °C/Вт. Это означает, что кристалл всегда имеет по крайней мере на 20 °C более высокую температуру, чем печатная плата, и что из-за высокого теплового сопротивления невозможно эффективно отводить тепло с поверхности корпуса.

У DirectFET эти же тепловые сопротивления равны всего 3 °C/Вт и 1 °C/Вт. Таким образом, температура кристалла и печатной платы практически равны, а низкое сопротивление кристалл—корпус позволяет эффективно отводить тепло по новому пути. DirectFET стал первым в мире корпусом с эффективным двусторонним охлаждением. Внешнюю поверхность корпуса можно охлаждать воздушным потоком, можно дополнительно разместить на поверхности корпуса (или в корпусах параллельно соединенных приборов) радиатор, охлаждаемый воздушным потоком, и, наконец, можно использовать теплопроводящие материалы (Gap Filler Pad) для передачи тепла с корпуса транзистора на шасси (рис. 7).

Специфическая конструкция корпуса DirectFET и отличные тепловые характеристики обеспечивают гораздо более высокую рассеиваемую мощность, чем у вариантов корпуса SO-8 (более 5 Вт — рис. 8). Это на 75 % выше, чем у корпуса SO-8, и в 3 раза выше, чем у корпуса Bottomless SO-8. DirectFET уступает (причем незначительно) только крупным корпусам BGA.

Технические характеристики транзисторов DirectFET

Компания IR выпустила первую серию силовых МОП-транзисторов в корпусе DirectFET (табл. 1) предназначенных для применения в узлах питания низкопрофильных серверов и ноутбуков.

Следует отметить низкое сопротивление канала (особенно у ключей синхронного выпрямления), что стало следствием преимуществ нового типа корпуса. Наряду с высокими тепловыми характеристиками это позволяет либо существенно улучшить тепловые режимы кристалла, либо существенно повысить нагрузочную способность транзистора по току в равных тепловых условиях для кристалла. Совместные испытания в понижающем неизолированном DC/DC-конверторе (12/1,3 В) на частоте 300 кГц при отсутствии принудительного охлаждения чипсетов IRF7459/IRF7456 в корпусах SO-8 и IRF6602/IRF6601 в корпусах DirectFET, у которых кристаллы изготовлены по одной и той же полосковой планарной технологии и имеют равные размеры, демонстрируют значительное преимущество новых транзисторов (рис. 9).

При максимальном рабочем токе (для корпуса SO-8), токе в фазе конвертора (16 А), температура кристалла транзисторов в корпусе SO-8 равна 125 °C. При этом же токе конвертор на транзисторах DirectFET имеет на 5 % более высокий КПД, а температура кристаллов ниже на 50 °C. Чипсет на транзисторах DirectFET позволяет поднять ток в фазе на 37 %, но и при этом температура кристалла не превышает 105 °C.

Еще большее преимущество дает применение принудительного охлаждения (рис. 10).

В испытываемых чипсетах IRF6604/IRF6603 (DirectFET) и IRF7811W/IRF7822 (SO-8) использованы самые эффективные на сегодняшний день кристаллы, изготовленные по технологии StripeTrench. При отсутствии охлаждения чипсет DirectFET имеет преимущество по току в фазе 33 %. Применение дополнительного оребренного VRM-охладителя и принудительного обдува обеспечивает уже почти двукратное превосходство по току с доведением тока в фазе до 35 А.

В многофазных конверторах один транзистор в корпусе DirectFET способен заменить до 3 параллельно работающих транзисторов в корпусе SO-8. Реализация многофазных

Таблица 1

Типономинал	BVdss (В)	Id (А)	RDS(on) (мОм)	QGD (нК)	Rthja (оС/Вт)	Технология	Применение
IRF6601	20	38А	2,7	20	12,5	Stripe Planar	Выпр.ключ, серверы
IRF6602	20	21А	18,5	5	12,5	Stripe Planar	Упр.ключ, серверы
IRF6603	30	45А	2	13	12,5	Stripe Trench	Выпр.ключ, ноутбуки
IRF6604	30	25А	12	4	12,5	Stripe Trench	Упр.ключ, ноутбуки

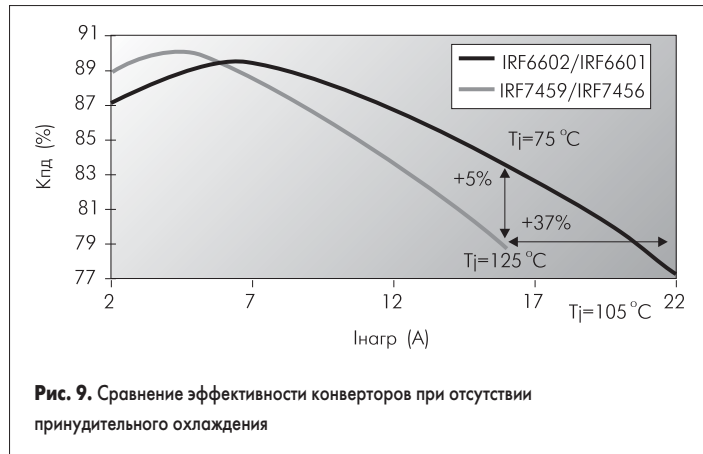


Рис. 9. Сравнение эффективности конвертеров при отсутствии принудительного охлаждения

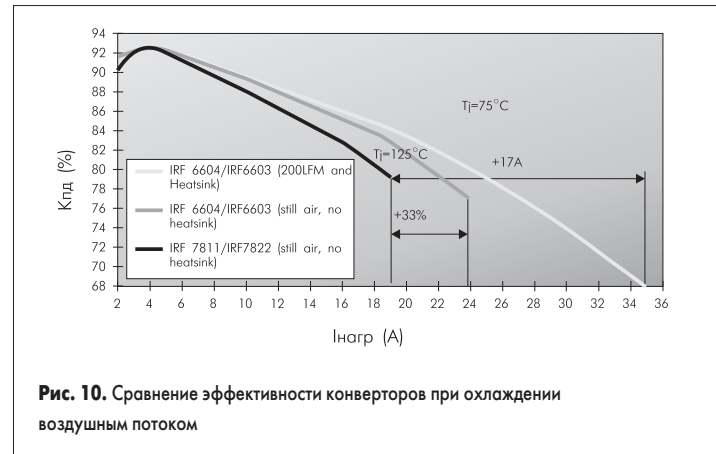


Рис. 10. Сравнение эффективности конвертеров при охлаждении воздушным потоком

конвертеров на транзисторах DirectFET дает возможность вдвое уменьшить площадь печатной платы. Четырехфазный конвертер (рис. 11) занимает на печатной плате площадь всего 30 см², что соответствует плотности тока конвертера около 4 А на 1 см² площади платы.



Рис. 11. Внешний вид 4-фазного DC/DC-конвертера на транзисторах DirectFET со стороны ШИМ-контроллера, выходных дроселей и конденсаторов (слева) и транзисторов (справа)

Транзисторы новой серии превосходят по основным характеристикам не только аналоги в номенклатуре IR, но и лучшие конкурирующие приборы. В табл. 2 представлены характеристики транзисторов DirectFET и аналогов в вариантах корпуса SO-8 и BGA других производителей. Показателем качества управляющего ключа синхронного выпрямителя DC/DC-конвертера является произведение сопротивления открытого канала на заряд переключения — $R_{ds(on)} \times Q_{sw}$. Именно этой величине прямо пропорциональна основная доля мощности потерь в таких ключах. Качество ключей синхронного выпрямления оценивается по величине $R_{ds(on)}$, поскольку в первую очередь в балансе потерь здесь играют роль потери на проводимость.

Управляющие ключи IRF6602 и IRF6604 имеют, по сравнению с аналогами, величину $R_{ds(on)} \times Q_{sw}$ ниже на 12–55 % и преимущественно по току до 2,5 раз. Выпрямительные ключи имеют сопротивление канала на уровне конкурирующих приборов или более низкое при выходном токе выше в 1,5–3,75 раза. Но главное преимущество новых приборов заключено в лучших тепловых характеристиках. Их усредненное тепловое сопротивление R_{thja} в 2–4,4 раза ниже, чем у аналогов в таблице. Поэтому только они способны полноценно реализовать все возможности кристалла.

Низковольтные транзисторы DirectFET на сегодняшний день являются реальным средством для реализации компактных 4-фазных конвертеров на ток 100 А для питания ядра процессоров новейших модификаций, которые будут применяться в новых поколениях низкопрофильных устройств (серверы, ноутбуки и т. д.). При этом 8 корпусов DirectFET заменяют 16 корпусов D-Pak или 20 корпусов SO-8, стоимость реализации охлаждения снижается в 1,5–2,5 раза и вдвое уменьшается площадь печатной платы. По этим причинам, несмотря на более высокую цену новых приборов, системная стоимость реализации такого конвертера снижается на 24–42 %. Это объясняет проявленный интерес к новой технологии многих авторитетных компаний. Многие производители компьютеров, серверов, материнских плат и VRM-модулей проявляют интерес к использованию DirectFET в своих новых разработках. Компании Aavid Thermalloy и Bergquist, ведущие производители охладителей и теп-

лопроводящих материалов, предложили IR сотрудничество в совместном внедрении своих разработок для полноценной реализации возможностей, предоставляемых новой технологией корпусирования.

Все перечисленные преимущества DirectFET далеко не исчерпывают возможности новой технологии корпусирования. В новом типе корпуса возможна также реализация целого ряда приборов на диапазон напряжений до 250 В — полевых транзисторов, ультрабыстрых диодов, диодов Шоттки с совершенно новым уровнем характеристик. Это, наряду с высокой устойчивостью корпуса к механическим воздействиям и исключительно высокими тепловыми характеристиками означает, что для новых приборов откроется широкий спектр приложений в изолированных DC/DC-конвертерах для телекоммуникационного оборудования со входными напряжениями до 48 В, в автоэлектронике, в промышленной технике с тяжелыми условиями эксплуатации и т. д.

Литература

1. В. Башкиров. Программа International Rectifier по созданию элементной базы для DC/DC конвертеров нового поколения // Электронные компоненты. 2000. № 4.
2. С. Blake, G. Stojic, N. Thapar. MOSFET technology advances DC/DC converter efficiency for processor power. PCIM 2001.
3. A. Sawle, M. Standing, T. Sammon. DirectFET—a proprietary new source mounted power package for board mounted power. PCIM 2001.

Таблица 2

V _{DSS} (В)	Компания	Корпус	Типономинал	R _{ds(on)} max 4,5 В (мОм)	R _{ds(on)} max 10 В (мОм)	Q _{gd} (нК)	R _{ds(on)} ×Q _{sw} (мОм нК)	Q _g (нК)	I _d (А)	R _{thja} max (С/Вт)
20	IR	DirectFET	IRF6602	17,00	11,50	5,00	85,00	13,00	14,00	12,50
20	Fairchild	BGA	FDZ201N	18,00	—	—	—	—	9,00	55,00
20	Siliconix	SO8	Si9426DY	13,50	—	14,00	189,00	47,00	10,00	50,00
20	IR	DirectFET	IRF6601	4,90	3,50	20,00	—	48,00	28,00	12,50
20	Siliconix	SO-8	Si4864DY	4,70	3,50	14,00	—	47,00	17,00	35,00
30	IR	DirectFET	IRF6603	5,50	3,90	13,00	—	68,00	45,00	12,50
30	Siliconix	PowerPak	Si7440DP	6,50	8,00	10,00	—	29,00	12,00	1,30
30	Fairchild	BGA	FDZ5047N	5,00	3,50	16,00	—	50,00	22,00	45,00
30	Fairchild	Bottomless-SO8	FDS7064N7	7,00	—	7,70	—	30,00	16,50	40,00
30	Fairchild	Bottomless-SO8	FDS7060N7	5,00	7,00	12,00	—	35,00	19,00	40,00
30	IR	DirectFET	IRF6604	11,50	10,50	7,00	80,50	17,00	25,00	12,50
30	STM	PowerSO8	STSJ25NF3LL	13,00	11,00	8,40	109,2	21,00	25,00	50,00
30	Siliconix	PowerPak	Si7848DP	12,00	9,00	7,50	90	18,50	10,40	25,00
30	Siliconix	PowerPak	Si7840DP	14,00	9,50	6,00	84	15,50	11,00	25,00