

Дискретные силовые MOSFET/IGBT-ключи

с выводом Кельвина

Рассмотрены характеристики и особенности применения силовых MOSFET- и IGBT-транзисторов в новом дискретном четырехвыводном корпусе TO-247-4. Использование дополнительного 4-го вывода истока/эмиттера (так называемого отвода Кельвина) позволяет исключить влияние паразитной индуктивности истока/эмиттера транзистора на выходное напряжение драйвера силового ключа и снизить потери при включении, в конечном счете увеличивая его КПД и рабочую частоту. Это актуально в таких областях применения, как источники питания (UPS), сварочная техника, индукционный нагрев, и других.

Анатолий Бербенец

berben@efo.ru

Введение

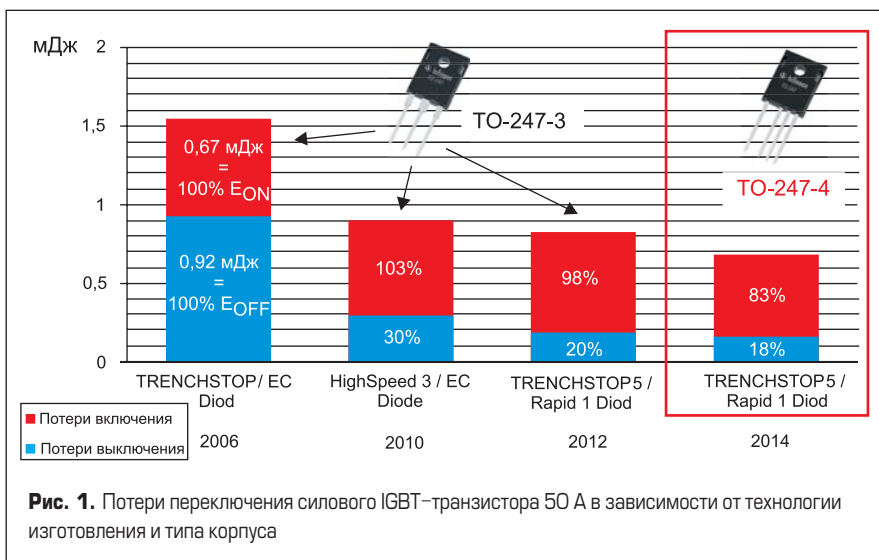
Современные достижения в технологии производства силовых IGBT/MOSFET (далее на примере IGBT-транзисторов) существенно снизили потери переключения. Эти достижения связаны с изменениями в структуре полупроводникового кристалла. На рис. 1 приведено сравнение двух составляющих потерь переключения в силовых IGBT, выпускаемых Infineon, в зависимости от технологий изготовления.

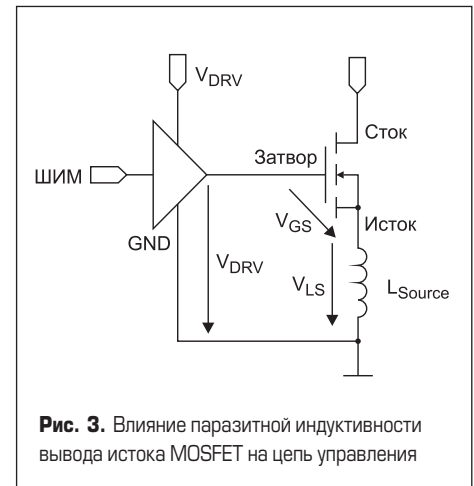
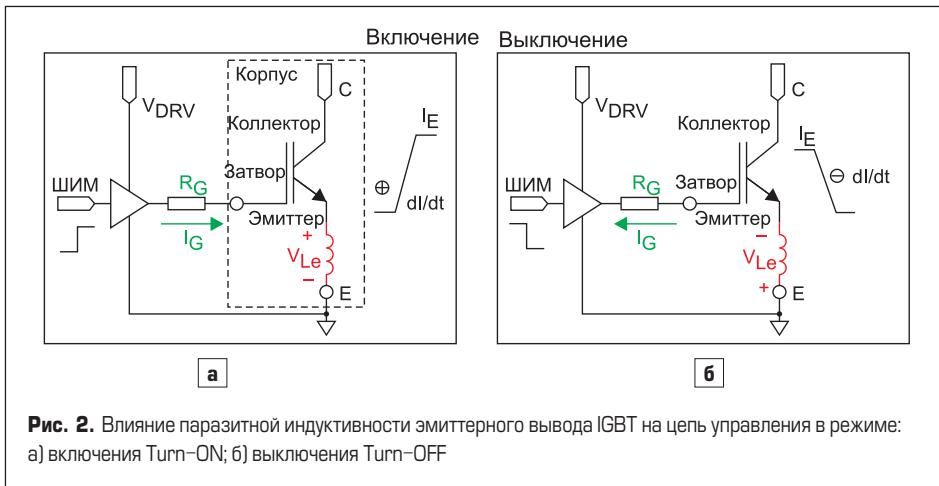
Потери переключения были измерены в стандартной схеме, в качестве испытуемых использовались образцы транзисторов, изготовленных по разным технологиям с одинаковыми номинальными токами. На рис. 1 заметно, насколько существенно

снизились потери выключения (E_{off}) за 4 поколения транзисторов. Это было достигнуто за счет существенного уменьшения такой характеристики транзистора, как время спада тока коллектора при выключении, то есть практически полного устранения так называемого «хвоста» тока коллектора, характерного для IGBT-транзистора. В то же время видно, что вторая составляющая — потери включения (E_{on}) — за рассматриваемый период практически не изменилась. Это обусловлено поведением IGBT-транзистора при включении, которое главным образом определяется встроенным антипараллельным диодом и величиной его заряда обратного восстановления. Действительно, значение данного заряда имеет тенденцию к увеличению при более быстрой технологии изготовления кристалла IGBT-ключа. Таким образом, с развитием рассматриваемых технологий потери включения IGBT-транзистора только увеличивались, что и отражает рис. 1.

Для существенного снижения подобных потерь был разработан новый 4-выводный корпус TO-247-4, в котором в настоящее время выпущено новое семейство силовых IGBT-транзисторов TRENCHSTOP5 [1, 2]. Корпус TO-247-4 содержит дополнительный вывод эмиттера (истока для MOSFET-транзистора), предназначенный для подсоединения драйвера управления силовым транзистором. Этот принцип уже успешно использован в MOSFET-транзисторах, выполненных по новой технологии CoolMOS C7 [3].

Применение дополнительного вывода Кельвина для эмиттера повышает скорость переключения транзистора. Следовательно, уменьшаются и потери переключения (обе составляющие), даже если используется тот же самый встроенный обратный диод. Более того, вследствие снижения потерь и по-





вышения КПД ключа уменьшается температура перехода кристалла.

Эмиттерный вывод Кельвина

В стандартных силовых транзисторных корпусах для монтажа в отверстие, например TO-220 или TO-247, каждый из выводов имеет паразитную индуктивность, величина которой может достигать единиц наногенри. При этом паразитная индуктивность, в частности, эмиттера IGBT-ключа входит как в контур управления ключом, так и в цепь силового тока.

Как видно на рис. 2, в цепь силового тока входит также паразитная индуктивность коллекторного вывода, а также дорожек печатной платы, соединяющих коллектор с источником питания. Влияние паразитной индуктивности эмиттера L_e на эффективное управляющее напряжение затвор-эмиттер $V_{ge,eff}$ при включении и выключении описано уравнениями (1) и (2) соответственно:

$$V_{GE,eff(Turn-on)} = V_{DRV,ON} - R_G \times I_G - L_e \times \frac{dI_c}{dt}, \quad (1)$$

$$V_{GE,eff(Turn-off)} = V_{DRV,OFF} - R_G \times I_G + L_e \times \frac{dI_c}{dt}. \quad (2)$$

Из них следует, что эффективное управляющее напряжение меньше выходного на-

пряжения драйвера в обоих режимах работы ключа на величину вычитаемых составляющих в уравнениях. Это уменьшение управляющего напряжения увеличивает время переключения, а значит, увеличивает и потери переключения. Аналогичный эффект наблюдается и в силовом MOSFET-ключе за счет влияния паразитной индуктивности истока L_{source} (рис. 3).

Корпус силового транзистора с выводом Кельвина

Новый транзисторный корпус TO-247-4 имеет дополнительный вывод эмиттера, обозначенный E2 на рис. 4.

Аналогичный дополнительный вывод истока (рис. 5) предусмотрен для силовых MOSFET-транзисторов нового поколения CoolMOS C7 [3].

Дополнительный вывод E2 подсоединяется непосредственно к драйверу, как показано на рис. 4. Этот отдельный эмиттерный вывод часто называют выводом Кельвина по аналогии с известным методом измерения низких сопротивлений, изобретенным лордом Кельвином. Суть метода в разделении линий питания измеряемого резистора током и линий измерения напряжения на нем. Данный принцип привел к так называемой четырехпроводной схеме измерения сопротивления, исключая из измерения сопротивления подводящих

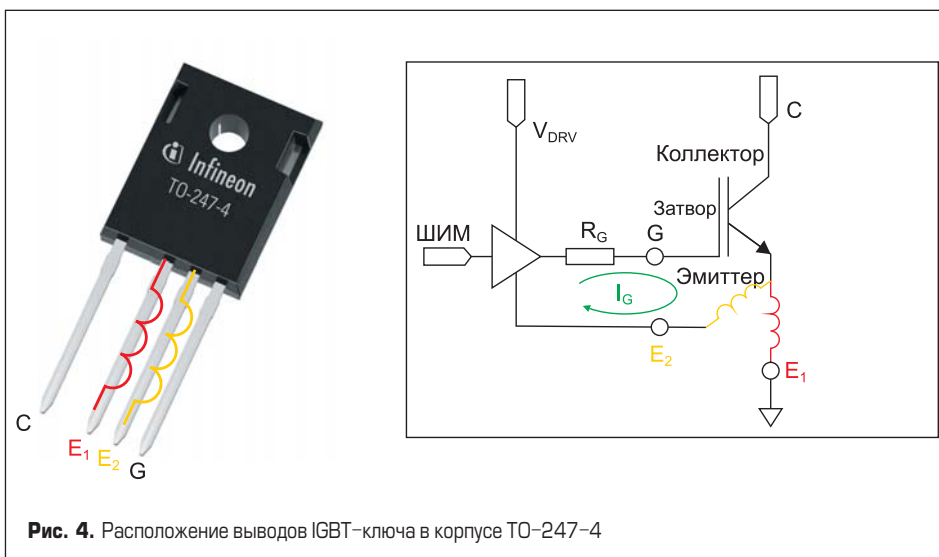
проводов, что повысило точность измерения низкоомных резисторов.

Возвращаясь к рис. 4, видим, что введение дополнительного вывода эмиттера Кельвина позволяет разделить управляющий и силовой контур и исключить из уравнений (1) и (2) составляющие, уменьшающие эффективное управляющее напряжение. Силовой ток замыкается через вывод E1.

Другое отличие нового корпуса TO-247-4 от стандартного — это взаимное расположение выводов, показанное на рис. 4. Оно обеспечивает соответствующее рабочее напряжение (650 В) и при необходимости позволяет облегчить взаимозаменяемость двух типов корпусов на печатной плате. IGBT-транзисторы в корпусе с выводом Кельвина отличаются в обозначении третьей буквой. Например, в артикуле IKZ50N65EH5 буква «Z» означает, что это транзистор в корпусе TO-247-4. Для стандартного корпуса TO-247-3 третья буква артикула — «W», то есть артикул такого транзистора выглядит как IKW50N65EH5.

Характеристики переключения

Как уже было сказано, в корпусе с выводом Кельвина IGBT-транзистор переключается



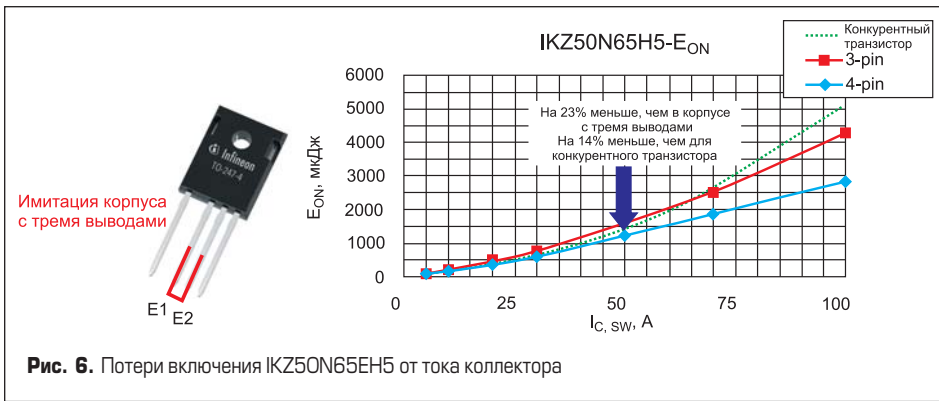


Рис. 6. Потери включения IKZ50N65EH5 от тока коллектора

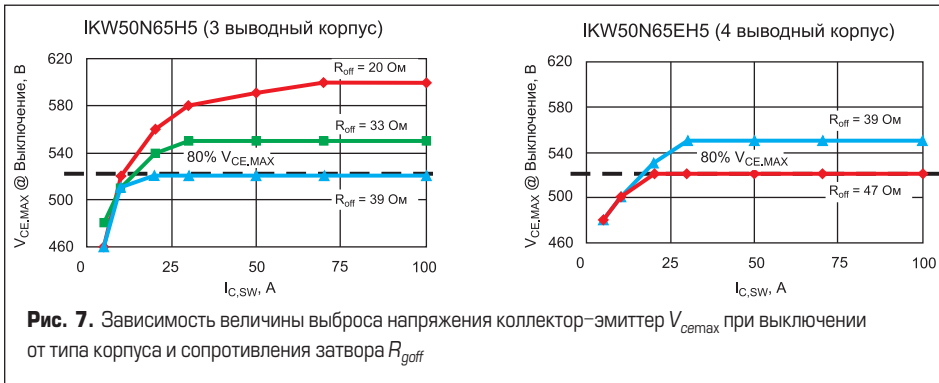


Рис. 7. Зависимость величины выброса напряжения коллектор-эмиттер $V_{CE,MAX}$ при выключении от типа корпуса и сопротивления затвора R_{goff}

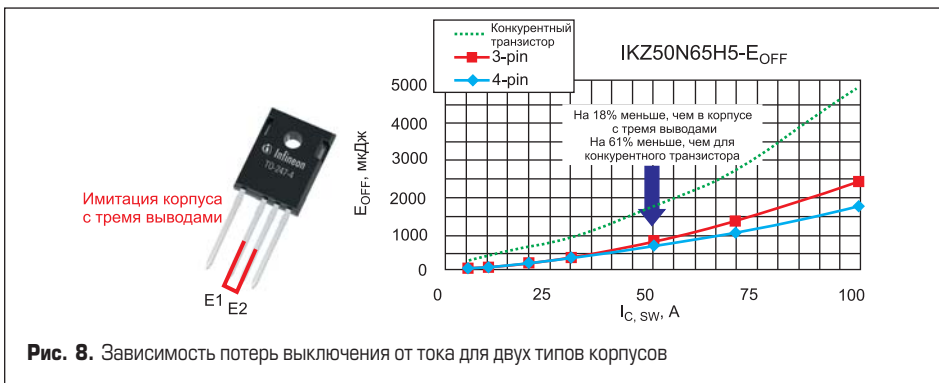


Рис. 8. Зависимость потерь выключения от тока для двух типов корпусов

быстрее, чем такой же в стандартном корпусе TO-247-3. Это происходит, поскольку уменьшается требуемая энергия переключения. Количественные оценки влияния данного снижения приводятся на примере IGBT-ключа ниже: сначала для режима включения (Turn-ON), затем для режима выключения (Turn-OFF).

Характеристики включения

Для измерений был выбран IGBT-транзистор в корпусе TO-247-4 с номиналь-

ным током 50 А типа IKZ50N65EH5. В первой серии измерений вывод Кельвина E2 не использовался. Выход драйвера был подключен непосредственно между затвором G и силовым эмиттером E1. Это эмулировало корпус с тремя выводами TO-247-3 (рис. 6).

Во второй серии измерений того же транзистора подключение драйвера происходило в соответствии с рис. 4, то есть с помощью дополнительного вывода эмиттера E2. Результат сравнения потерь включения для двух вариантов приведен на рис. 6. Также показан (точ-

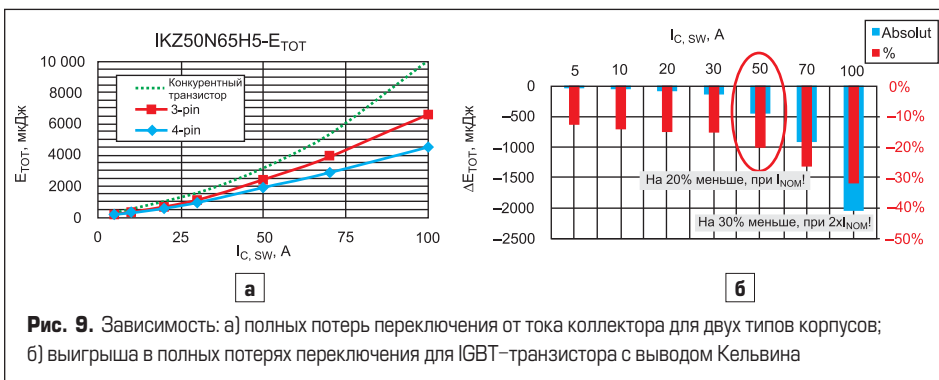


Рис. 9. Зависимость: а) полных потерь переключения от тока коллектора для двух типов корпусов; б) выигрыша в полных потерях переключения для IGBT-транзистора с выводом Кельвина

ками) результат измерений потерь включения для 50 А IGBT-транзистора конкурентного производителя в стандартном корпусе TO-247-3. Из графиков следует, что для транзистора IKZ50N65EH5 (с эмиттерным выводом Кельвина) выигрыш в потерях включения E_{on} составил 23% на номинальном токе 50 А.

Характеристики выключения

Так же как и в режиме включения, IGBT-транзистор в новом корпусе в режиме выключения стал быстрее. Следовательно, скорость изменения тока коллектора dI/dt повысилась. Тогда, если паразитная индуктивность в контуре не изменилась, это приведет к увеличению выброса коллекторного напряжения, иначе перенапряжению. Этот эффект подробно рассмотрен в [2] и сделан вывод: чтобы избежать повышенного перенапряжения для транзисторов в новом корпусе, надо либо снижать паразитную индуктивность в контуре выключения, например оптимизируя разводку печатной платы, либо увеличивать резистор затвора по цепи выключения G_{off} . На рис. 7 представлены графики величины перенапряжения при выключении для однотипных IGBT-транзисторов в корпусах с тремя и четырьмя выводами в зависимости от тока при разных величинах R_{goff} . Видно, что величину перенапряжения с запасом в 20% до максимально допустимого напряжения коллектор-эмиттер в транзисторе с четырьмя выводами можно получить при больших величинах R_{goff} , чем для стандартного корпуса.

Таким образом, чтобы снизить выброс, увеличиваем R_{goff} но тогда увеличиваются потери выключения и выигрыш от применения нового корпуса частично уменьшается. Сравняя потери выключения 50 А IGBT-транзистора IKZ50N65EH5, видим (рис. 8), что заметный выигрыш по потерям выключения для 4-выводного корпуса получается при токах коллектора, превышающих номинальный ток 50 А.

Полные потери переключения

Полные потери переключения для трех вариантов протестированных IGBT-транзисторов приведены на рис. 9. Видно, что преимущество транзисторов с выводом Кельвина наиболее заметно для диапазона токов коллектора выше номинального, где выигрыш может превышать 20%. Это актуально для таких приложений, как, например, источники бесперебойного питания. В устройствах, где силовые ключи работают в диапазоне половины номинального тока коллектора, скажем, в ключевых источниках питания, выигрыш от применения нового корпуса будет ниже, достигая 15% полных потерь переключения.

Рекомендации по применению IGBT-транзисторов с выводом Кельвина

Рекомендации по выбору драйвера для IGBT-транзистора с выводом Кельвина

Драйвер для IGBT-транзистора в корпусе TO-247-4 должен удовлетворять двум важным требованиям:

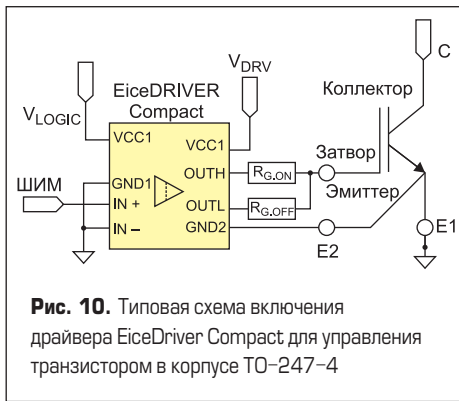


Рис. 10. Типовая схема включения драйвера EiceDriver Compact для управления транзистором в корпусе TO-247-4

- Общий вывод драйвера, подключенный к дополнительному эмиттеру Кельвина, должен быть гальванически изолирован от силовой земли. Это необходимо для исключения закорачивания выводов E1 и E2 силового транзистора.
- Рекомендуется использовать отдельные резисторы затвора для включения и выключения $R_{g\ on}$ и $R_{g\ off}$ так как оптимальные сопротивления для режимов включения и выключения могут существенно отличаться. Этим условиям, например, полностью удовлетворяют микросхемы драйвера семейства EiceDriver Compact [4]. На рис. 10 приведена схема включения такого драйвера для управления IGBT-транзистором с дополнительным выводом эмиттера.

Параллельное включение силовых ключей в корпусе TO-247-4

В случае параллельного соединения силовых транзисторов в корпусе с выводом Кельвина появляется дополнительный путь протекания тока между выводами эмиттеров. Этот контур показан на рис. 11а. Ток протекает между соединенными выводами эмиттеров E1 и E2. Ввиду низкого импеданса контура даже минимальная разница в индуцированных на паразитных ин-

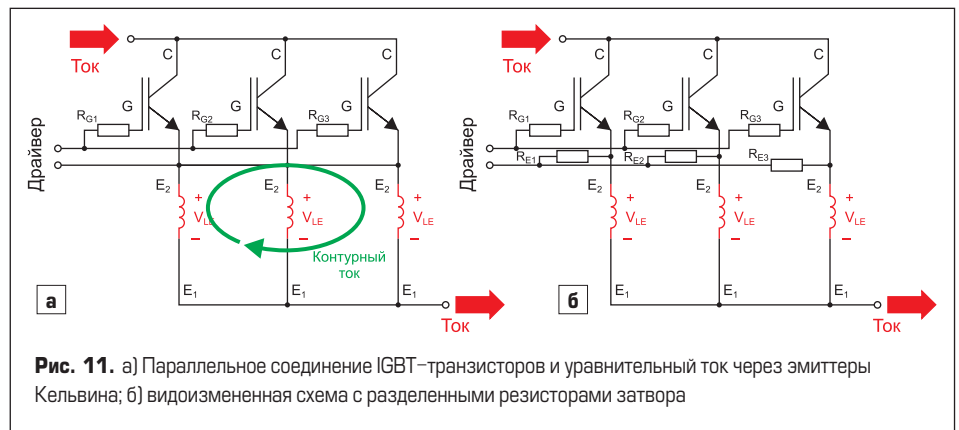


Рис. 11. а) Параллельное соединение IGBT-транзисторов и уравнительный ток через эмиттеры Кельвина; б) видоизмененная схема с разделенными резисторами затвора

дуктивностях напряжениях V_{le} может вызвать значительный ток в контуре.

Это может произойти, в частности, если включенные параллельно IGBT-транзисторы имеют разные времена включения и, следовательно, разные величины di/dt . Для ограничения таких токов можно модифицировать схему, как показано на рис. 11б. Затворные резисторы разделяются на 2 части — R_g и R_e , одна из которых подсоединяется к затвору, а вторая к эмиттеру Кельвина. В этом случае в дополнительный контур добавляется сопротивление, ограничивающее ток в нем до безопасного значения. Полное сопротивление затворного резистора определяется суммой R_g и R_e . Из практики соотношение R_e/R_g выбирают в диапазоне 1/5–1/10, при этом R_e не должно быть менее 0,5 Ом.

Выводы

- Рассмотрено новое в отрасли семейство TRENCHSTOP5 быстродействующих IGBT-транзисторов в корпусе TO-247-4 с дополнительным выводом эмиттера (выводом Кельвина).
- Использование вывода Кельвина на примере IGBT-транзистора позволяет получить

снижение полных потерь переключения до 20% в диапазоне номинальных токов.

- Приведены рекомендации по выбору драйвера для управления новыми транзисторами, рассмотрены особенности управления параллельным соединением силовых IGBT-ключей в корпусе TO-247-4.
- Предложен оптимальный драйвер для применения с IGBT-транзисторами с выводом Кельвина.
- В аналогичном корпусе TO-247-4 с дополнительным выводом истока производится семейство CoolMOS C7 MOSFET-транзисторов с суперпереходом (Superjunction) на рабочее напряжение 650 В.

Литература

1. www.infineon.com
2. TRENCHSTOP5 IGBT in a Kelvin Emitter Configuration, Application Notes, 2014.
3. CoolMOSTM C7 650V Switch in a Kelvin Source Configuration, Application Notes, 2013.
4. Бербец А. EiceDriver — семейство микросхем высоковольтных драйверов IGBT и MOSFET // Силовая электроника. 2013. № 6.