

Технология корпусирования TRENCHSTOP Advanced Isolation:

низкое тепловое сопротивление + надежность

Силовые компоненты, требующие рассеивания больших мощностей, устанавливаются на радиаторы системы отвода тепла и, как правило, должны быть надежно электрически изолированы. Традиционные решения для изоляции полупроводниковых приборов в корпусах типа TO предполагают использование изоляционных прокладок, изолирующих втулок для крепежа и специальной теплопроводящей пасты. Естественно, что при сборке такие операции не поддаются автоматизации и выполняются вручную, а потому дорогостоящи и неудобны для применения в крупносерийном производстве. Корпуса FullPAK отличаются более простыми требованиями к сборке, но имеют высокое тепловое сопротивление в цепочке передачи тепла от полупроводникового кристалла к теплоотводу. Новая система изоляции для полупроводниковых приборов, предложенная компанией Infineon Technologies AG и получившая название TRENCHSTOP Advanced Isolation, представляет собой полностью изолированное решение, которое не требует при сборке теплоизоляционных прокладок и втулок, а также теплопроводящей смазки, одновременно обеспечивая и электрическую изоляцию и эффективный, надежный путь передачи тепла от полупроводникового кристалла IGBT-транзистора к радиатору системы охлаждения. Новая технология корпусирования обеспечивает повышенную плотность мощности, увеличивает надежность полупроводниковых приборов, а также, что немаловажно, снижает себестоимость конечной продукции и упрощает ее изготовление в условиях массового производства. Кроме того, предлагаемый новый корпус имеет значительно более низкое тепловое сопротивление при установке на радиатор по сравнению со стандартными корпусами типов TO-247 и TO-247 FullPAK.

Перевод:
Владимир Рентюк

Введение

Для корпусирования большинства современных силовых электронных компонентов обычно используются корпуса из терморезистивных пластмасс, и для повышения эффективности отвода тепла от полупроводникового перехода они имеют открытую площадку кристаллодержателя. В условиях практического применения, для улучшения тепловых характеристик устройства, такие компоненты обычно монтируются на внешнем радиаторе. При этом несколько силовых компонентов, как правило с различными электрическими потенциалами, устанавливаются на общем радиаторе. Таким образом, для обеспечения безопасности и должного функционирования каждое полупроводниковое устройство должно быть электрически изолировано и от других компонентов, и от самого радиатора, но без значительного влияния на путь отвода генерируемого ими тепла.

Для достижения необходимой электрической изоляции обычно используемые корпуса, например стандартный TO-247, должны иметь изолирующий слой или материал между металлическим основанием и радиатором. Для этой цели используется слюда или силиконовые прокладки, которые для уменьшения теплового сопротивления устанавливаются с помощью специальной теплопроводящей смазки. Такое решение во время сборки требует тщательного соблюдения плоскостности при установке, а сборочный узел может быть загрязнен излишками смазки, выдавленной из-под транзистора после затяжки крепления. Кроме того, теплопроводящая смазка со временем сохнет, что делает ее менее эффективной с точки зрения теплопроводности.

Другим распространенным решением является использование полупроводниковых приборов в полностью изолированных корпусах, в которых транзистор целиком залит формовочным компаундом. Естественно, в производстве легче использовать

устройства в полностью изолированных корпусах, чем те, что имеют открытую металлическую площадку присоединения кристалла, поскольку в этом случае нет необходимости принимать определенные меры к их электрической развязке от радиатора. Но, к сожалению, полупроводниковые приборы в полностью изолированных корпусах имеют высокое тепловое сопротивление при передаче тепла от полупроводникового кристалла к радиатору, что, собственно, и ограничивает их рабочую мощность. К тому же они, как правило, также устанавливаются на теплопроводящую смазку.

По сравнению с устройством в корпусе FullPAK полупроводниковые приборы в изолированных корпусах технологии TRENCHSTOP Advanced Isolation, при соблюдении требований по их монтажу, не нуждаются ни в дополнительной изоляции от радиатора системы охлаждения, ни в теплопроводящей смазке. Основное преимущество этой технологии над корпусированием FullPAK — низкое полное тепловое сопротивление от полупроводникового кристалла до радиатора. Таким образом, рабочая мощность силового прибора, ограниченная тепловыми свойствами корпусирования FullPAK, здесь больше не является сдерживающим фактором. С технологией Advanced Isolation устройства могут эксплуатироваться на полную мощность, ограниченную только их полупроводниковым кристаллом. Кроме того, рассматриваемая технология корпусирования предоставляет новый корпус с гарантированной долговременной теплопроводностью и высокой надежностью изоляции в соответствии с жесткими требованиями действующих промышленных стандартов [1].

Особенности корпусов технологии TRENCHSTOP Advanced Isolation

Корпусирование Advanced Isolation является частью семейства полностью изолированных корпусов. Полупроводниковый прибор в корпусе, выполненном по этой технологии, имеет специальный слой с хорошими теплопроводными характеристиками и высокими электроизоляционными свойствами. Этот слой Advanced Isolation инкапсулирует и изолирует медную теплоотводящую пластину на устройстве с открытой площадкой для присоединения кристалла, аналогично тому, как это выполнено в стандартных корпусах TO-247-3. На рис. 1 показаны верхняя и нижняя стороны корпуса Advanced Isolation для транзистора технологии TRENCHSTOP, выполненного в корпусе TO-247-3. Новый корпус Advanced Isolation специально разработан для полной совместимости со стандартным TO-247-3 как по внешнему виду, так и по посадочным размерам.

Нижняя сторона полупроводникового прибора представляет собой изоляционный слой с высокой теплопроводностью. По сравнению со стандартным изолированным корпусом TO-247-3 FullPAK или TO-3P FullPAK этот слой примерно на 50% снижает тепловое сопротивление от полупроводникового пере-



Рис. 1. Верхняя и нижняя стороны транзистора, выполненного в корпусе TO-247-3 по технологии TRENCHSTOP Advanced Isolation

хода к радиатору. Как уже было сказано, для достижения столь низкого теплового сопротивления при сборке конечного устройства не требуется какая-либо специальная дополнительная смазка.

Полупроводниковые приборы в корпусах, выполненных по технологии Advanced Isolation в номенклатуре IGBT-транзисторов и диодов компании Infineon, идентифицируются буквой F на третьей позиции — например, как в IKFW40N60DH3E. Этот высокоскоростной IGBT-транзистор третьего поколения доступен в двух версиях: «лучший по цене/производительности» и «лучший в своем классе». Полупроводниковые приборы в номенклатуре IGBT-транзисторов и диодов от компании Infineon в версии «лучший по цене/производительности» обозначаются буквой E на последней позиции — например, IKFW40N60DH3E. Данная версия служит хорошей заменой для транзисторов в корпусах FullPAK или TO-247-3, изолированных изоляционной прокладкой из пленки среднего

качества. Это относится и к стандартной прокладке из изоляционного материала на основе полиимида с толщиной 152 мкм и коэффициентом теплопроводности 0,9 Вт/(м·К). Версия, указанная как «лучшая в своем классе» заменяет TO-247-3, изолированный высококачественным изолятором, в частности прокладкой, выполненной на основе полиимидной усиленной несущей изоляционной пленки толщиной 152 мкм с коэффициентом теплопроводности 1,3 Вт/(м·К).

Влияние изолирующего материала на теплопроводность

Улучшенные тепловые характеристики корпуса технологии Advanced Isolation достигаются за счет устранения почти всех контактных $R_{th\ C-TIM}$ и минимизации переходных тепловых сопротивлений между площадкой для присоединения кристалла и радиатором. На рис. 2 сравниваются два решения этой проблемы: обычный подход в виде слоев из традиционно используемых для передачи тепла материалов с теплопроводящей изолирующей прокладкой (thermal interface material, TIM — термическим интерфейсом) и вариант, предлагаемый технологией Advanced Isolation. Как можно видеть, объемное тепловое сопротивление слоя изоляционного материала $R_{th\ bulk}$, примененного в рамках технологии Advanced Isolation, значительно ниже, чем у классического решения с теплопроводящей изолирующей прокладкой. Кроме того, при использовании изоляционного материала с более высокой объемной теплопроводностью сумма контактных тепловых сопротивлений корпус-TIM и TIM-радиатор становится более релевантной.

Оценка надежности корпусов технологии Advanced Isolation

Корпуса полупроводниковых приборов, выполненные по технологии Advanced

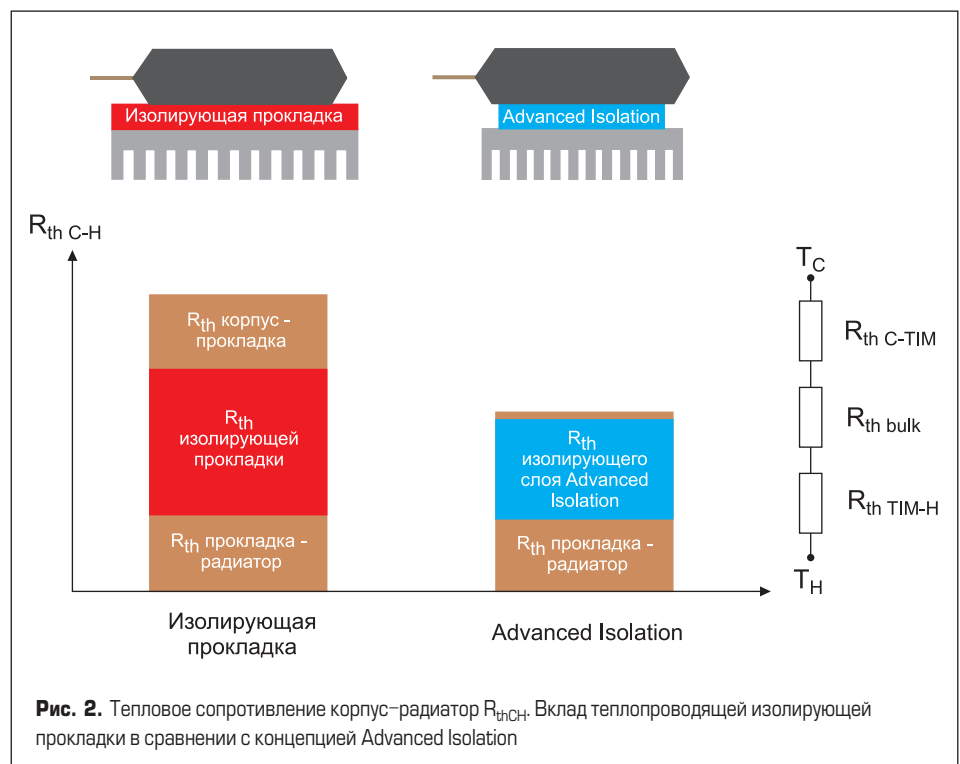


Рис. 2. Тепловое сопротивление корпус-радиатор $R_{th\ C-H}$. Вклад теплопроводящей изолирующей прокладки в сравнении с концепцией Advanced Isolation

Таблица. Результаты оценки надежности корпусов TRENCHSTOP TO-247-3 Advanced Isolation

Тип испытаний	Условия испытания	Длительность испытаний	Результат
Термоциклирование	T = -55...+150 °C	1500 циклов	Пройдено
Выдержка в автоклаве	T ₀ = +121 °C Относительная влажность = 100% Давление = 100 кПа	196 ч	Пройдено
Термоциклирование с установкой на радиатор	T = -55...+150 °C Усилие = 0,2–2 Н·м	2000 циклов	Пройдено
Выдержка при повышенной температуре (выключенное состояние)	T = +175 °C	1000 ч	Пройдено
Выдержка при пониженной температуре (выключенное состояние)	T = -55 °C	1000 ч	Пройдено
Испытания на включение / выключение	ΔT _J = 100 K I _{CE} ≈ 50% I _{CEmax}	30 000 циклов	Пройдено
Выдержка в условиях высокой температуры и влажности при приложенном напряжении постоянного тока между площадкой для присоединения кристалла и радиатором	T = +85 °C Относительная влажность = 85% V = 1,4 кВ	2000 ч	Пройдено

Isolation, полностью изолированы и имеют гарантированную электрическую прочность изоляции не менее 2,5 кВ (скз) при длительности воздействия 60 с. Для подтверждения долгосрочного сохранения изоляционных и теплопроводящих характеристик и оценки общей надежности полупроводниковых приборов, реализованных в корпусах рассматриваемой технологии, устройства были протестированы по стандарту JESD22 Комитета инженерной стандартизации полупроводниковой продукции при Electronic Industries Alliance. Эти испытания предусматривали температурные циклы в выключенном состоянии, а также тестирование на устойчивость и деградацию изоляции под напряжением 1,4 кВ постоянного тока, приложенным между площадкой для присоединения кристалла полупроводникового прибора

и радиатором в условиях максимальной температуры и повышенной влажности. В результате проведенных испытаний установлено, что все механические и электрические характеристики полупроводниковых приборов в корпусах, выполненных по технологии Advanced Isolation, остаются неизменными и не деградируют во время выдержки под напряжением в условиях высокой влажности, устойчивы к температурным циклам. Кроме того, корпус прошел испытания на устойчивость к агрессивной среде смешанного газа (испытания на коррозию в среде текущей газовой смеси) в соответствии с требованиями стандарта IEC 60068-2-60: 2015-06 и испытания, связанные с оценкой деградации контактного сопротивления при подаче высокого напряжения (согласно стандарту IEC 60512-4-1: 2003-05 такие тесты обычно

проводят для разъемов). В таблице приведены условия проведения и результаты испытаний по оценке надежности корпусов технологии Advanced Isolation.

Особенности монтажа полупроводниковых приборов в корпусах технологии Advanced Isolation на радиаторы

Полупроводниковые приборы в корпусе, использующем технологию Advanced Isolation, могут быть установлены непосредственно на радиаторе с помощью зажима или винта [2]. Однако необходимо учитывать, что изоляционный слой корпуса не предназначен для его использования в качестве последнего изоляционного барьера и конечное устройство нельзя эксплуатировать, пока оно не будет предварительно проверено на радиаторе, соответствующем конкретной конструкции и в полностью завершеном собранном виде [3]. При сборке следует избегать неправильного использования зажимных систем, а также не соответствующих требованиям крепежных элементов и изгибания выводов. Кроме того, при сборке не рекомендуется применять инструменты, создающие вибрацию. Нарушения правил монтажа могут привести к царапинам, порезам или другим повреждениям изоляционного слоя. Если устройство правильно смонтировано на радиаторе, изделия в корпусах технологии Advanced Isolation не требуют использования дополнительных внешних изоляционных материалов или теплопроводящей пасты. Эта особенность новой технологии корпусирования значительно упрощает сборку по сравнению с другими видами сборки, требующими изолирования дополнительными прокладками в устройствах, выполненных в таких стандартных корпусах, как FullPAK, IsoPAK или TO-247-3.

Измерение тепловых характеристик и сравнение технологий

Для того чтобы оценить тепловые характеристики полупроводниковых приборов, выполненных в новых корпусах технологии Advanced Isolation, они были подвергнуты сравнительным натурным испытаниям, которые предусматривали определение тепловых и электрических параметров транзисторов в составе собранных конечных устройств. В первом тесте транзистор в модернизированном корпусе TO-247-3 Advanced Isolation сравнивался с транзистором в корпусе TO-247-3, использующим традиционное решение с усиленной изоляционной прокладкой. Во втором тесте транзистор в корпусе TO-247-3 Advanced Isolation сравнивался с транзистором в изолированном корпусе FullPAK. Все испытания проводились с применением радиаторов одинакового размера и с одинаковым усилием, приложенным к каждому тестируемому полупроводниковому прибору при его монтаже на радиатор, обеспечивающим оптимальное тепловое сопротивление.

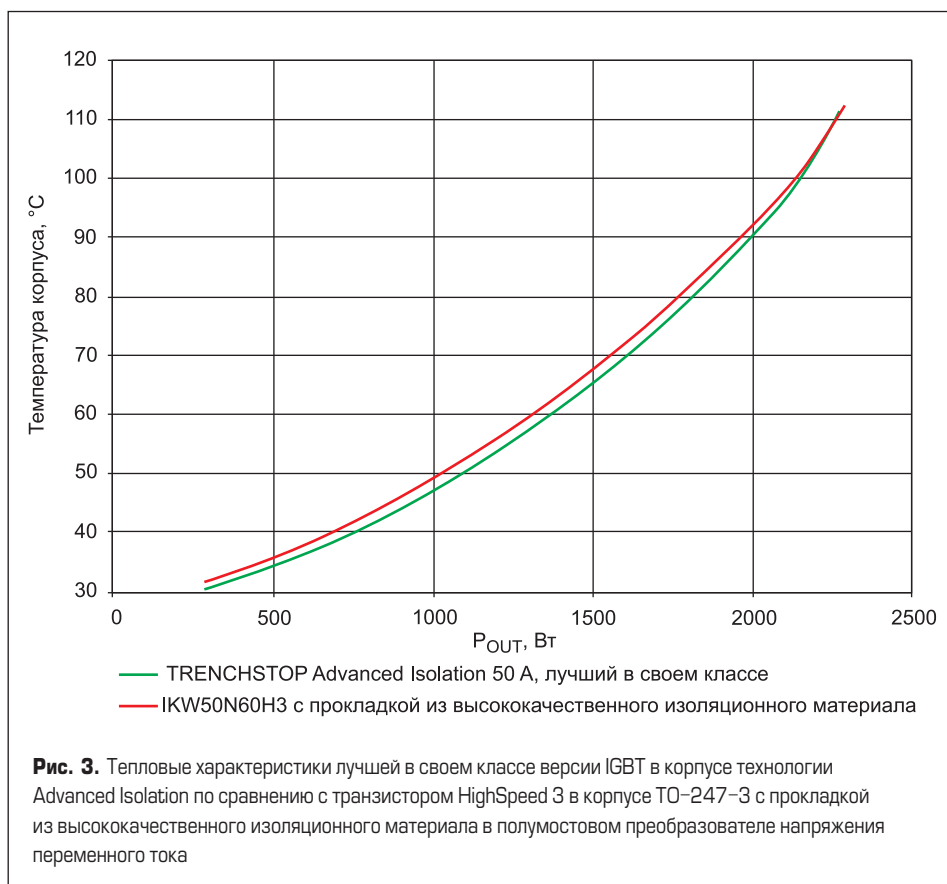


Рис. 3. Тепловые характеристики лучшей в своем классе версии IGBT в корпусе технологии Advanced Isolation по сравнению с транзистором HighSpeed 3 в корпусе TO-247-3 с прокладкой из высококачественного изоляционного материала в полумостовом преобразователе напряжения переменного тока

Сравнение тепловых характеристик полупроводниковых приборов в корпусах TO-247-3 Advanced Isolation и TO-247-3 с изоляционной прокладкой

Тепловые характеристики лучшего в своем классе IGBT в корпусе Advanced Isolation, рассчитанного рабочий ток 50 А, сравнивались с имеющим тот же размер кристалла транзистором IKW50N60H3, который был установлен с помощью изоляционной пленки между площадкой для присоединения кристалла и радиатором. Конфигурация конечного оборудования, действовавшего в ходе испытаний, представляет собой полумостовой преобразователь напряжения переменного тока мощностью 2200 Вт. Используемая в ходе определения тепловых характеристик изоляционная прокладка была выполнена из коммерчески доступной изоляционной пленки толщиной 152 мкм на основе полиимиды с коэффициентом теплопроводности 1,3 Вт/(м·К), которая считается высококачественным изолирующим материалом. Номинал резисторов затвора был выбран так, чтобы максимально безопасно удерживать пик перенапряжения IGBT ниже 600 В, не допуская его превышения. Для всех видов испытаний использовались одни и те же уровни воздействия [4]. На рис. 3 видно, что температура корпуса наилучшей в своем классе версии соответствует уровню транзистора IKW50N60H3, установленного на прокладку из высококачественного изоляционного материала.

Как можно видеть из графика, приведенного на рис. 3, тепловые характеристики IGBT-транзисторов в корпусе, реализованном по технологии Advanced Isolation, аналогичные стандартному решению в части корпусирования, достигаются без использования изолирующего материала и теплопроводящей пасты.

Сравнение тепловых характеристик полупроводниковых приборов в корпусах TO-247-3 Advanced Isolation и TO-247-3 FullPAK

В этом тесте тепловые характеристики IGBT-транзистора с рабочим током 40 А в корпусе технологии Advanced Isolation сравниваются с аналогичным транзистором, рассчитанным на рабочий ток 40 А и выполненным в корпусе FullPAK. Анализ тепловых характеристик проводился в составе платы корректора коэффициента мощности (power factor correction, PFC). Транзистор в корпусе по технологии Advanced Isolation представлял собой версию с оптимальным соотношением цены и производительности, наиболее подходящей для сравнения с транзисторами

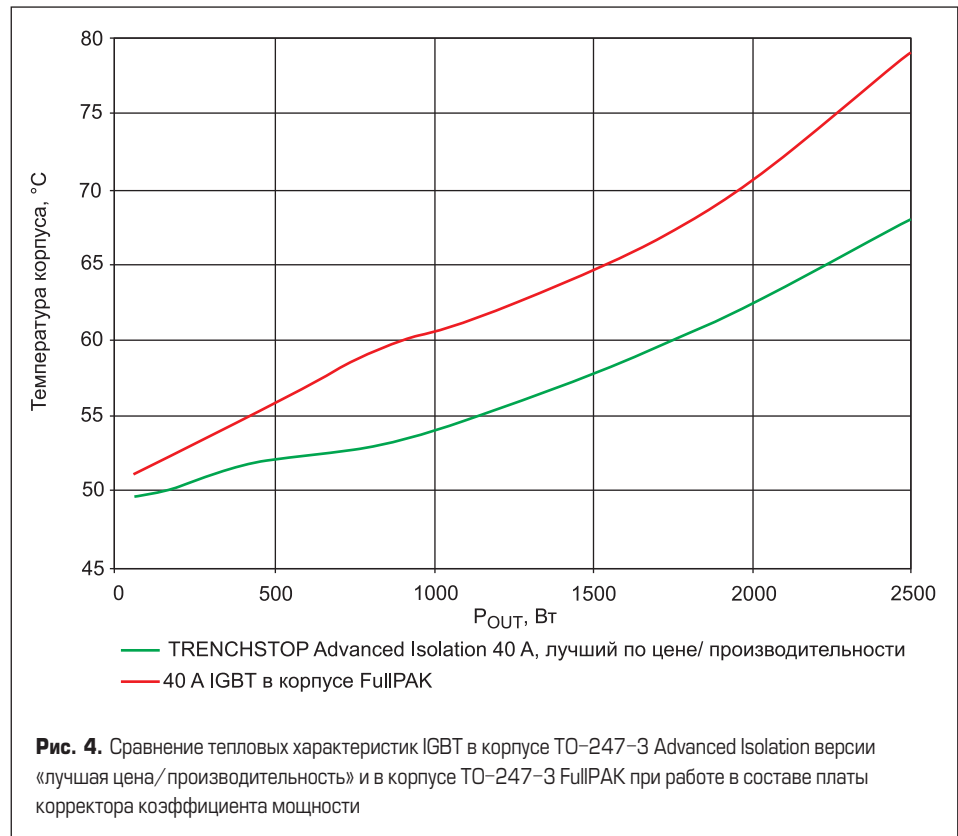


Рис. 4. Сравнение тепловых характеристик IGBT в корпусе TO-247-3 Advanced Isolation версии «лучшая цена/производительность» и в корпусе TO-247-3 FullPAK при работе в составе платы корректора коэффициента мощности

в корпусах FullPAK. Контрольная плата PFC работала с частотой коммутации 22 кГц при входном напряжении 230 В переменного тока и выходном напряжении 400 В постоянного тока. Во время всех испытаний использовалось одинаковое значение резистора затвора, выбранное для снижения максимального пика перенапряжения IGBT, которое находится ниже напряжения пробоя перехода коллектор-эмиттер. На рис. 4 представлены результаты измерения тепловых характеристик, показывающие, что температура корпуса FullPAK при выходной мощности 2500 Вт оказалась на 11 °C выше по сравнению с температурой аналогичного по электрическим характеристикам и условиям работы транзистора в корпусе Advanced Isolation.

Выводы

Корпус технологии Advanced Isolation, разработанный и предлагаемый компанией Infineon Technologies AG, обеспечивает электрическую изоляцию между силовыми компонентами и радиатором системы без использования электроизоляционного материала и теплопроводящей пасты. Хорошая теплопроводность представленного варианта корпусирования обеспечива-

ет высокие тепловые характеристики полупроводникового прибора, находящиеся на одном уровне с параметрами традиционного решения, в котором применены высококачественные изоляционные материалы вместе с теплопроводящей пастой, и имеет лучшие тепловые характеристики по сравнению с корпусами FullPAK. Корпусирование полупроводниковых приборов по технологии Advanced Isolation от компании Infineon — это настоящий технологический прорыв в решениях корпусирования дискретных силовых приборов.

Литература

1. Kasztelan C., Basler T., Mengel M., Fürgut E. Taking Power Semiconductors to the Next Level: Novel Plug & Play High Thermal Performance Insulated Molded Power Package. PCIM, Nuernberg, 2017.
2. Infineon Technologies AG: AN2017-42, TO-247-3 Advanced Isolation, V1.0, October 2017.
3. Infineon Technologies AG: Recommendations for Assembly of Infineon TO Packages, March 2008.
4. Infineon Technologies AG: IKW30N60H3, 2014. www.infineon.com