

Тепловое сопротивление

как показатель надежности мощных выпрямительных мостов

Алексей Мальцев

malcev@mail.ru

Иван Мальцев

Известно, что общая надежность радиоэлектронной аппаратуры в значительной степени зависит от надежности силовых компонентов, например выпрямительных мостов в источниках питания. Разработчики постоянно оказываются перед необходимостью выбора как самих силовых компонентов, так и режимов работы, особенно коэффициента нагрузки по мощности. Уменьшение этого коэффициента автоматически повышает надежность работы силового компонента, но одновременно увеличивает стоимость аппаратуры в целом, так как силовые компоненты вместе с системами охлаждения имеют высокую цену. Как показывает обзор литературных источников, часто мощные выпрямительные мосты выходят из строя от внутреннего перегрева, который провоцирует тепловой пробой диодов. Известно, что для тепловой модели любого полупроводникового прибора общее тепловое сопротивление «кристалл–окружающая среда» состоит из суммы тепловых сопротивлений «корпус–окружающая среда» и «кристалл–корпус» или «переход–корпус». Если тепловое сопротивление «корпус–окружающая среда» определяется способом отвода тепла от силового компонента и есть возможность его уменьшения с помощью радиаторов внешнего обдува или другими способами, то тепловое сопротивление «переход–корпус» целиком определяется изготовителем силового компонента, и не в силах конструктора его уменьшить. Если величина теплового сопротивления «переход–корпус» превышает величину, указанную в документации на данный компонент, никакие меры по дополнительному охлаждению не спасут, это неизбежно приведет к перегреву силового компонента и выходу его из строя. Тепловое сопротивление «переход–корпус» определяется как самой конструкцией силового компонента, материалами корпуса, способом посадки кристалла, так и технологиями его изготовления. Можно считать, что тепловое сопротивление является интегральным показателем качества силового компонента. Кроме того, при измерении теплового сопротивления «переход–корпус» испытуемый силовой компонент остается целым, т. е. речь идет о методах неразрушающего контроля. Еще одной важной проблемой рынка радиоэлектронных силовых компонентов является выявление контрафактной, некачественной продукции, использующей бренды известных фирмы. Если до недавнего времени силовые компоненты можно было отличить

по качеству корпуса или по лазерной маркировке, то в последнее время появились контрафактные силовые компоненты с лазерной маркировкой, что значительно усложняет выявление подделок. Эту задачу можно решить, измеряя разброс теплового сопротивления партии силовых компонентов. Высокий разброс теплового сопротивления «переход–корпус» в партии является показателем нестабильного технологического процесса, что характерно для контрафактной продукции.

Несмотря на это, диагностика силовых компонентов по тепловому сопротивлению «переход–корпус» применяется довольно редко. Одна из причин — отсутствие серийных тестеров для таких измерений. Кроме того, большое разнообразие типов корпусов силовых компонентов приводит к тому, что трудно изготовить универсальное подключающее устройство для эффективного отвода тепла от корпуса исследуемого силового компонента, без чего, как будет показано ниже, невозможно точное измерение требуемого параметра.

Чтобы узнать величину теплового сопротивления «переход–корпус», необходимо измерить перегрев кристалла относительно корпуса полупроводникового прибора. Известно несколько методов: оптический, химический, физический и электрический [1]. Наибольшее распространение получил электрический метод [1–3], при котором используется предварительно прокалброванный чувствительный к температуре параметр испытываемого прибора. Этот способ основан на использовании корреляционных методов и очень удобен для массового контроля. Измерение теплового сопротивления проводят в два этапа. На первом выбирается выходной параметр исследуемого компонента, имеющий температурную зависимость, и определяется его температурный коэффициент напряжения (ТКН). Для выпрямительных мостов наиболее удобным параметром является прямое падение напряжения на выпрямительном диоде: оно имеет линейную зависимость от температуры, поэтому для определения ТКН достаточно выбрать две точки графика. Второй этап — непосредственно измерение теплового сопротивления, которое может проводиться на полностью собранных в корпусах приборах. Для измерений мостов был выбран метод «измерения теплового сопротивления «переход–корпус» и импульсного теплового сопротивления с использованием зависимости прямого напряжения диода от температуры и разогрева импульсами



Рис. 1. Внешний вид подключающего устройства

прямого тока» (по ГОСТ 19656.15-84, метод II) [3]. Согласно этому методу, тепловое сопротивление «корпус–окружающая среда» должно быть не более 5% от величины теплового сопротивления «переход–корпус». Для выполнения этого условия необходимо применять специальные подключающие устройства, которые позволяют эффективно охлаждать исследуемый компонент. Чем меньше тепловое сопротивление «корпус–окружающая среда», тем точнее измерение теплового сопротивления «переход–корпус». Учитывая, что последний параметр у мощных компонентов может быть менее 1 °C/Вт, это непростая задача. При рассеиваемой на исследуемом компоненте мощности более 1 Вт рационально применять радиаторы с обдувом вентилятором. Скорость потока воздуха должна быть не менее 4–5 м/с. Для точности и повторяемости измерений необходимо иметь для подключающего устройства двукратный запас по рассеиваемой мощности [4].

В качестве объекта исследования были взяты кремневые выпрямительные мосты KBPC5010 компании WTE power semiconductor с максимальным средневыпрямленным током 50 А. При питании моста переменным напряжением через каждое его плечо протекает средневыпрямленный ток 25 А. Мощность, выделяемая на мосте KBPC5010, при максимальном токе составляет 60 Вт. В качестве подключающего устройства использовался радиатор с вентилятором. Исследуемые мосты закреплялись на радиаторе с применением теплопроводящей пасты КПТ-8. На рис. 1 по-

казан внешний вид подключающего устройства для измерения теплового сопротивления «переход–корпус».

С учетом обдува вентилятором, мощность, рассеиваемая подключающим устройством, составила 150 Вт. Измерение теплового сопротивления производилось с помощью специально разработанного тестера. Чтобы не вывести исследуемые мосты из строя, испытания проводились при токе через каждый диод моста 10 А. В таблице приведены значения тепловых сопротивлений «переход–корпус» R_{θ} каждого из диодов исследуемых мостов KBPC5010.

Результаты исследований

Согласно документации, мосты KBPC5010 (см. Datasheet) должны иметь тепловое сопротивление «переход–корпус» не более 1,5 °C/Вт. Как видно из результатов измерений 8 образцов, реальные тепловые сопротивления каждого из диодов у всех проверяемых мостов составляют 7–9,9 °C/Вт, т. е. в 5–6 раз превышают величину, указанную в документации на фирменные мосты. Очевидно, что при таком тепловом сопротивлении «переход–корпус» уже при силе тока 15 А перегрев кристаллов моста превышает 100 °C, т. е. приближается к максимально допустимой для данного компонента температуре. Кроме того, мосты имеют большой разброс тепловых сопротивлений, порядка 40% в партии, а это показатель нестабильного технологического процесса изготовления этих изделий. Для подтверждения проведенных измерений тепловых сопротивлений у одного из исследуемых мостов была удалена боковая стенка корпуса. Внешний вид моста KBPC5010 без боковой стенки показан на рис. 2.

Как видно на рис. 2, кристалл диода моста не имеет теплового контакта с нижней поверхностью для отвода тепла, а просто висит в застывшей эпоксидной смоле. Между кристаллом диода и нижней теплоотводящей поверхностью находится слой эпоксидной смолы толщиной 1–1,5 мм. Даже с учетом теплопроводящего наполнителя, эпоксидная смола имеет низкую теплопроводность, что приводит к перегреву кристаллов. Сверху и снизу кристалла диода видна зона вспененной эпоксидной смолы, что является следствием сильного нагрева диода. Дальнейшее увеличе-



Рис. 2. Внешний вид моста KBPC5010 без боковой стенки

ние тока до 15 А и более могло привести к выходу из строя диодного моста. Визуальный контроль подтвердил выводы, сделанные после измерения тепловых сопротивлений «переход–корпус»: данные выпрямительные мосты KBPC5010 не соответствуют техническим условиям и могут выйти из строя уже при коэффициенте нагрузки по мощности, равном 0,3. На основании этого можно сделать вывод, что это не фирменные изделия, а подделка.

В заключение надо отметить, что измерения теплового сопротивления «переход–корпус» дают разработчику ценную информацию о реальном токе и мощности, которые способен выдержать конкретный силовой компонент. В наиболее ответственных случаях целесообразно проводить 100%-й входной контроль силовых компонентов. Выход из строя таких компонентов, как выпрямительные мосты, может повлечь за собой тепловой пробой с последующим замыканием диодов. А это приведет к катастрофическим последствиям для остальной части прибора. Контроль теплового сопротивления позволяет оперативно выявить некачественные силовые компоненты и выбрать оптимальные коэффициенты нагрузки, что дает возможность спрогнозировать отказы силовых компонентов и тем самым существенно повысить надежность радиоэлектронной аппаратуры в целом.

Литература

1. Зигель Л. Измерение теплового сопротивления — ключ к обеспечению нормального охлаждения полупроводниковых компонентов // Электроника. 1978. № 14.
2. EAI/JEDEC STANDART. Integrated Circuits Thermal Measurement Method – Electrical Test Method (Single Semiconductor Device). EIA/JESD51-1
3. ГОСТ 19656.15-84. «Диоды полупроводниковые СВЧ. Методы измерения теплового сопротивления переход–корпус и импульсного теплового сопротивления».
4. Федоренко Ю. С., Закс Д. И., Долматов Т. В. Условия однозначного определения тепловых параметров микросхем // Электронная техника. Сер. 8. Т. 28. 1974. № 10.

Таблица. Значения тепловых сопротивлений «переход–корпус» R_{θ}

Номер выпрямительного моста	Диод № 1	Диод № 2	Диод № 3	Диод № 4
	$R_{\theta}, \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$			
№ 1	8,2	7,4	7,9	7,1
№ 2	9,1	9,3	9,2	8,9
№ 3	7,9	8	7,7	8,1
№ 4	7,6	7,8	7,4	7,2
№ 5	8,9	8,8	9	8,7
№ 6	9,2	9,1	9	9,5
№ 7	9,3	9,8	9,9	9,7
№ 8	7,3	8,3	7,1	7,1