

Сложности оценки

характеристик SiC MOSFET

Широкое распространение SiC MOSFET на рынке силовой электроники еще ограничивается их более высокой стоимостью по сравнению с Si MOSFET, но это, безусловно, временное явление и с развитием SiC-технологии ситуация будет улучшаться. В то же время более перспективные характеристики SiC требуют и более внимательного подхода к проектированию и измерению их параметров в реальных приложениях, чему и уделяется внимание в данной статье.

**Леви Гант (Levi Gant)
Ханинг Занг
(Xuning Zhang, Ph. D.)**

**Перевод:
Иван Полянский**

ixysrus@gmail.com

Точность измерения характеристик SiC MOSFET в реальных приложениях очень зависит от переходных процессов и паразитных параметров схемы.

Сегодня много внимания уделяется SiC MOSFET, поскольку они способны быстро переключаться при высоком блокирующем напряжении. Но выдающиеся коммутационные характеристики имеют и обратную сторону. Так, паразитные индуктивности, возникающие из-за неоптимальной компоновки печатной платы, при высоких dV/dt и di/dt , свойственных SiC MOSFET, способны создавать выбросы напряжения, броски тока, а также приводить к увеличению потерь переключения и ухудшению стабильности системы. Для того чтобы преодолеть данные проблемы, разработчик должен очень хорошо понимать все характеристики переключения SiC MOSFET.

Кроме того, высокое быстродействие SiC MOSFET создает определенные сложности и при оценке характеристик их переключения. Например, выбор измерительного оборудования оказывает существенное влияние на точность результатов измерений и испытаний. На выбросах напряжения, потерях при переключении и ЭМС не менее сильно сказываются компоновка изделия, а также параметры схемы управления и силовой части.

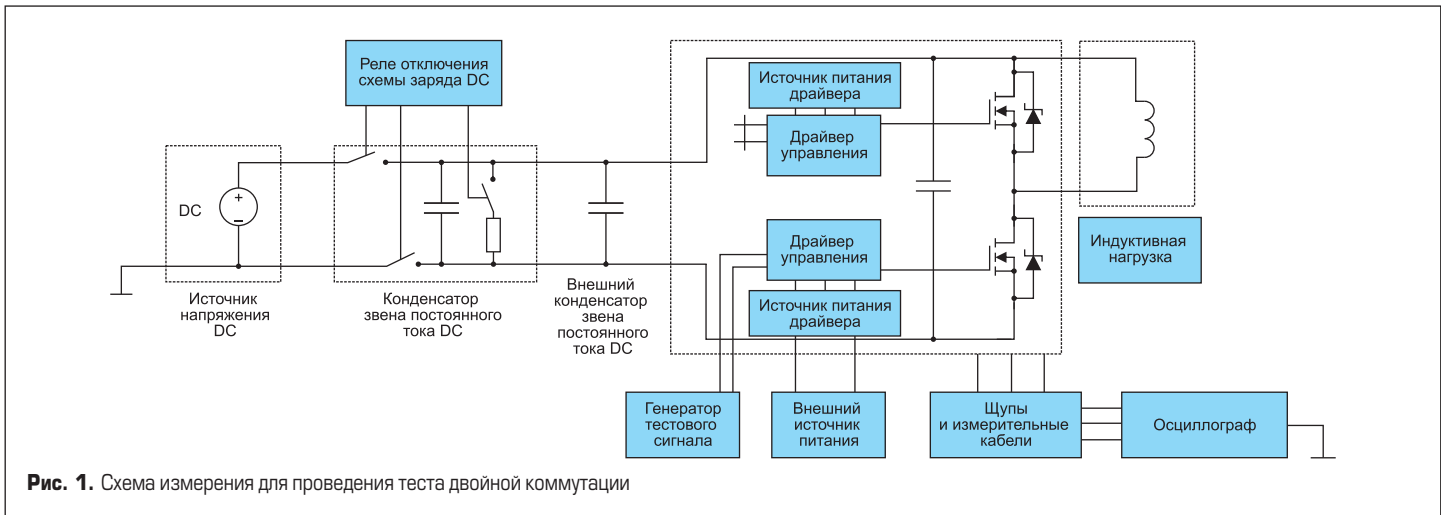
Как удостовериться в точности измерений при испытаниях

При высокой скорости переключения SiC MOSFET наличие собственных паразитных параметров корпуса силовых ключей и самого изделия весьма затрудняет оценку конкретных компонентов. Высокие значения dV/dt и di/dt при измерениях усиливают неточности измерения выбросов напряжения и тока. Так, высокие значения dV/dt приводят не только к выбросам напряжения при переходных процессах, но и к синфазному шуму и затухающим высокочастотным колебаниям. Высокие di/dt вызывают шумы, которые могут взаимодействовать с окружающими магнитными полями. Перечисленные эффекты затруднительно измерять и диагностировать. Необходимо применять специальное оборудование и методы для выявления скрытых проблем,

прежде чем они проявятся в процессе испытаний или приведут к полному отказу. Следует использовать широкополосное оборудование с большим динамическим диапазоном для оценки SiC MOSFET при коммутации большой мощности на высоких напряжениях.

Дифференциальные щупы широко используются при измерениях на высоком напряжении, но наличие гальванической развязки в таких щупах накладывает ограничение на полосу пропускания. Наоборот, пассивный щуп имеет широкую полосу пропускания, но лишен гальванической развязки. Кроме того, многие пассивные щупы неприменимы на высоких напряжениях. В данном случае необходимо предусмотреть традиционный резистивный делитель напряжения в самой схеме. Для учета всех влияний лучшим решением будет пассивный щуп с широкой полосой пропускания, способный работать на высоком напряжении при высоких dV/dt .

Для измерения токовых характеристик могут быть использованы четыре метода: катушка Роговского, активный токовый щуп, токовый трансформатор и коаксиальный токовый шунт. У каждого метода есть свои преимущества и недостатки — например, активный токовый щуп и катушка Роговского оказывают несущественное влияние на измеряемую схему, но не обеспечивают широкой полосы пропускания, необходимой для измерения кратковременных выбросов тока (так называемый звон — ringing). Токовый трансформатор, с одной стороны, имеет широкую полосу пропускания, достаточную для передачи «звонковых» эффектов, но, с другой — требует ответвление тока, что может оказаться узким местом для измеряемой схемы. Одновременно токовый трансформатор, так же как и катушка Роговского, не может обеспечить измерение постоянного тока. Токовый шунт тоже накладывает ограничения на измеряемую схему, при этом не обеспечивает гальванической изоляции в отличие от трех остальных методов. Однако токовый шунт часто становится лучшим решением при проверке работоспособности схемы, поскольку способен отобразить весь спектр сигналов от DC до нескольких МГц. Нужно отметить, что токовый шунт рассеивает небольшую мощность, поэтому его разумно применять только



при импульсных кратковременных тестах, а не при постоянной и длительной работе схемы.

Оптимизация силовой части

Большинство силовых схем имеет две составляющие: схему драйвера управления и схему силовой части. Для силовой части характерны высокие уровни токов и напряжений при высоких скоростях переключения, что приводит к возникновению проблем выбросов напряжения и тока, а также к «звонковым» эффектам. Причина возникновения выбросов и звона кроется в наличии паразитных индуктивностей и емкостей силовой схемы.

Одна из первоочередных проблем силовой части — выброс напряжения во время выключения. Такой выброс возникает из-за наличия в цепи паразитной индуктивности при изменении тока di/dt . Задача разработчика — получить максимальное значение di/dt , поэтому необходимо обеспечить минимально возможное значение паразитной индуктивности. Выбросы напряжения, достигающие максимально допустимых величин для силовых ключей, способны привести к катастрофическим последствиям для всей схемы. В случае если паразитная индуктивность не может быть снижена, разработчику необходимо либо уменьшить скорость переключения, либо применить многоуровневую топологию, что в любом случае усложняет проектирование и увеличивает стоимость решения.

Существует также проблема электромагнитной интерференции: во время коммутации выбросы тока способны сделать из силового контура излучающую антенну, генерирующую широкополосный шум в диапазоне нескольких МГц, который способен взаимодействовать с другими участками схемы, оказывая на них воздействие. В отдельных случаях это влияние может приводить к непредсказуемому открыванию силовых ключей или выходу из строя периферии схемы, не говоря о потенциальных сложностях с прохождением тестов на электромагнитную совместимость.

Первый принцип оптимизации силовой схемы — стараться проектировать ее наиболее компактным и простым образом, минимизируя область контура коммутации. Идеальным вариантом, недостижимым на практике, будет точка в пространстве без проводников/выводов и т. п. Более реалистичный вариант, применяемый на практике, — «зеркальное» перекрытие проводников, симметрично расположенных в двух слоях печатной платы для входа и выхода контура коммутации.

Другой способ оптимизации силовой схемы — применение развязывающих конденсаторов. Процесс коммутации на высокой частоте создает гармоники высшего порядка от частоты коммутации f_s , что вместе с частотами переходных процессов f_{trans} формирует спектр вплоть до единиц МГц. Обычно конденсатор звена постоянного тока работает как заградительный фильтр для гармоник основной частоты коммутации f_s , снижая их амплитуду, но не способен подавлять частоты переходных процессов f_{trans} , которые могут оказывать воздействие на ближайшие участки схемы. Для подавления этих частот f_{trans}

обычно используют пленочный конденсатор достаточной величины, установленный параллельно звену постоянного тока, но как можно ближе к ключам, чтобы минимизировать паразитную индуктивность в контуре коммутации.

Проектирование драйвера управления

Схема управления выполняет две основные задачи: включение и выключение силовых ключей в нормальном, безопасном и контролируемом режиме, а также защита силовой части, когда это требуется. Выполнение таких задач невозможно без правильного проектирования топологии изделия и хорошей интеграции силовой части с драйвером управления. Общими проблемами здесь становятся нежелательные потери при коммутации, выбросы напряжения затвора, «звонковые» эффекты и электромагнитные помехи, способные вывести из строя схему управления.

Даже невысокий уровень общей индуктивности L_{csi} препятствует быстрому нарастанию тока и увеличивает потери коммутации. Неизбежное наличие индуктивности затвора и стока L_g и L_s при высоких di/dt создает существенные выбросы напряжения на затворе ключа. Всплески напряжения на затворе способны привести к непредсказуемому открыванию ключа и последующим катастрофическим последствиям для схемы при прохождении сквозных токов. Повторяющееся превышение напряжения на затворе также вызывает деградацию характеристик ключей и снижает их надежность.

Лучшая практика при разработке драйвера управления и его интеграции с силовой схемой — максимальное снижение индуктивной связи контура драйвера и контура силовой части. Везде, где это возможно, следует располагать оба контура в ортогональных плоскостях. Далее, при оптимизации силового контура, нужно одновременно минимизировать область контура управления с помощью как «расслоения», так и минимизации соединительных путей. Дополнительно, для снижения индуктивности стока, применяют развязку силовой части и драйверы управления за счет использования корпусов с дополнительным Кельвиновским стоком, например четырехвыводный корпус ТО-247 или семивыводный ТО-263.

Для оценки производительности ключей SiC в частотном режиме используют тест двойной коммутации (рис. 1). Данный тест предполагает двойное последовательное включение транзистора. При этом длительность первого импульса включения в совокупности с индуктивностью и напряжением звена постоянного тока определяют амплитуду импульса тока при закрывании транзистора. В течение времени между первым и вторым импульсами на включение энергия, накопленная в индуктивности, циркулирует через обратный диод. Данная операция позволяет увидеть все важные параметры коммутации во время нарастания второго импульса на включение.

При проведении теста двойной коммутации индуктивность подключается параллельно верхнему ключу в полумостовой схеме и создает прямой путь при закрывании нижнего ключа тестируемого изделия (device under test DUT). Данная тестовая схема применяется для оцен-

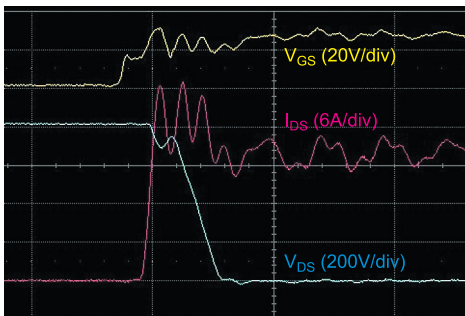
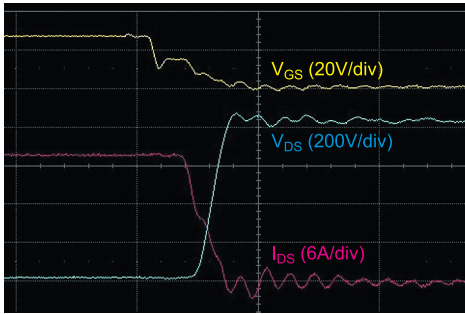


Рис. 2. Результаты теста двойной коммутации при напряжении в звене постоянного тока 800 В, ток ключа 20 А. Верхний рисунок – при разрешении 10 мкс/дел., средний – процесс закрывания, увеличено до 50 нс/дел., нижний рисунок – процесс включения при 50 нс/дел. Таким образом, показано поведение MOSFET в плане энергии коммутации, скорости переключения, времени нарастания и спада, выбросов напряжения и т.д.

ки энергии коммутации и заряда затвора драйвера разрабатываемого изделия. Результатом теста являются осциллограммы напряжения затвор-сток V_{GS} , напряжения исток-сток V_{DS} и тока стока I_{DS} (рис. 2). В тесте используются реле, управляемые напряжением для отключения источника питания (нарастания и спада) от тестируемой схемы. Емкость конденсатора звена постоянного тока выбирают достаточной, чтобы сохранять нужное напряжение на всем протяжении теста двойной коммутации после отключения источника питания. Это улучшает качество теста, а также снижает риск звона через контур заземления. Если конфигурация не позволяет использовать настолько большой конденсатор, чтобы отключить источник напряжения, его все равно следует выбрать достаточно крупным для обеспечения нужного уровня напряжения при переключениях.

Высокая скорость переключения SiC MOSFET означает высокие скорости изменения напряжения и тока dV/dt и di/dt на уровне выше 80 В/нс и 5 А/нс в большинстве случаев. Поскольку SiC MOSFET переключаются в течение десятков наносекунд, щупы для измерения должны обеспечивать нужную полосу пропускания, быстродействие (динамические характеристики) и малую собственную емкость.

Программа Matlab служит удобным инструментом для определения числовых величин измеряемых параметров транзисторов.

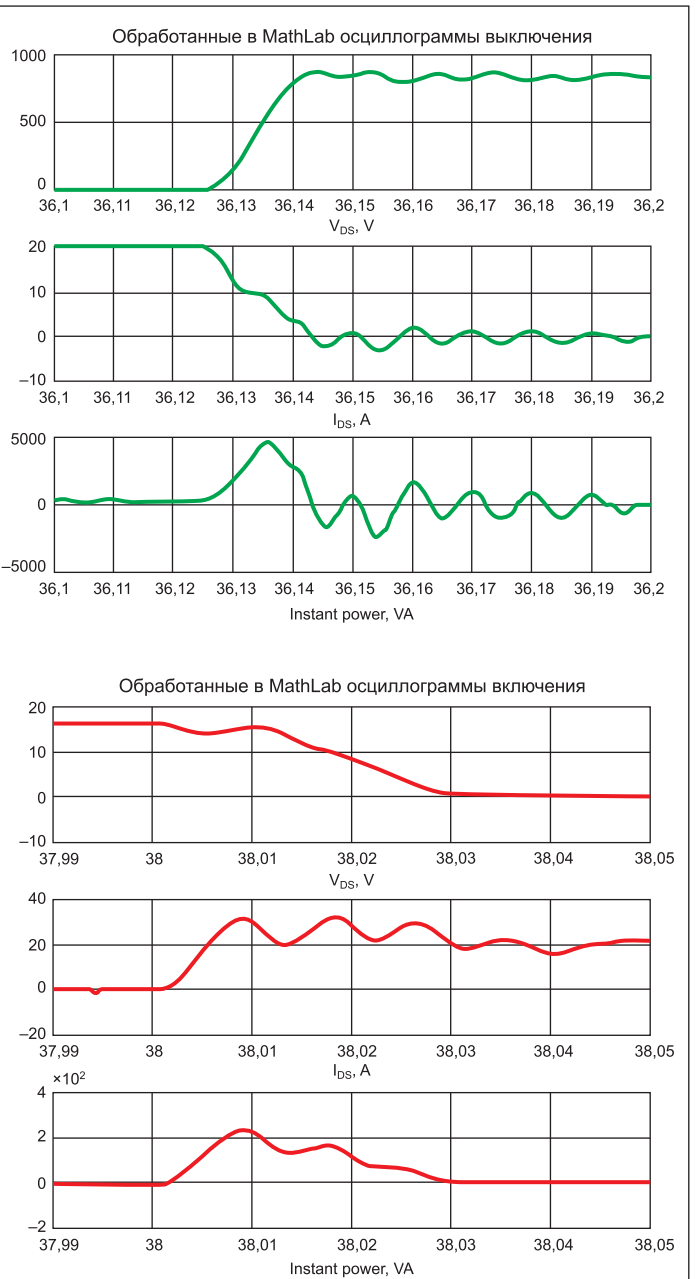


Рис. 3. Результаты математической обработки результатов измерения в тесте двойной коммутации

Когда получены сырые данные измерений V_{DS} и I_{DS} , они должны быть «выровнены» соответствующим способом (рис. 3). Построение графика ближайших значений дает представление об особенностях изменения напряжения V_{DS} во время включения и выключения, характеристике тока стока I_{DS} и мгновенной мощности. На основании этих графиков могут быть вычислены значения энергии переключения проектируемого изделия. Приведенные осциллограммы показывают, что при закрывании транзистора наблюдается всплеск напряжения порядка 70 В, скорость изменения напряжения составляет 68,72 В/нс, $di/dt = 1$ А/нс, потери энергии при закрывании ~60 мкДж. При открывании импульс тока составляет ~10 А, $dV/dt = 39,47$ В/нс, $di/dt = 5,2$ А/нс, а потери на включение ~270 мкДж. При этом величина потерь коммутации была получена методом интегрирования мгновенной энергии.

Тест двойной коммутации является достаточно объективным способом определения основных характеристик переключения SiC MOSFET, их основных динамических параметров: времени включения и выключения, а также заряда затвора и времени обратного восстановления. Поэтому данным тестом можно пользоваться для определения целесообразности применения тех или иных транзисторов в конкретном разрабатываемом приложении.