

Вы за SiC или кремний?

Часть 3. Тенденции в применении SiC в электромобилях

Это третья публикация, продолжающая цикл из шести статей [1], в которых рассматриваются текущие тенденции применения полупроводниковых приборов на основе карбида кремния (SiC). Цель цикла — предоставить систематизированные общие сведения по этой относительно новой, но уже вполне заслуженно завоевывающей популярность технологии и областях ее применения. Первая и вторая части цикла в авторском переводе с рядом поясняющих дополнений доступны по ссылкам [2, 3]¹.

Ануп Бхалла (Anup Bhalla)

Перевод и дополнения:
Владимир Рентюк

Применение полупроводниковых приборов на основе SiC в преобразовании энергии электромобилей

Легковые электромобили, еще совсем недавно казавшиеся некой экзотикой, демонстрируют быстрый рост производства и продаж, которые, как ожидается, получат значительное ускорение в ближайшие десять лет. Уже сейчас все крупные производители автомобилей имеют четкие планы по выпуску электромобилей как личного транспорта и активно сотрудничают со своими партнерами в поиске лучшей силовой электроники, чтобы максимизировать диапазон мощностей и минимизировать затраты. Даже такие компании, как Xiaomi и Huawei, рассматривают возможность выхода на рынок автомобилей и делают соответствующие инвестиции.

Основные приложения для устройств на основе карбида кремния (SiC), представляющие интерес в рамках предлагаемого цикла статей, показаны на рис. 1. По прогнозам, к 2030 году поставки таких компонентов применительно именно к электрическим транспортным средствам составят, если удастся преодолеть пандемию вируса COVID-19 и сопутствующий ей кризис (давайте будем оптимистами), не менее \$10 млрд.

Самым мощным элементом является тяговый инвертор электромобиля, который мы обсудим в следующей статье цикла. Здесь мы остановимся на двух других основных компонентах — встроенном зарядном устройстве и DC/DC-преобразователе. Кроме требований по производительности, и в первую очередь по эффективности и экономичности, они все чаще задействуют двунаправленный поток энергии и значительно выигрывают от быстрых ключей



Преимущества полевых транзисторов от UnitedSiC

- Встроенные зарядные устройства
 - * Стандартный драйвер затвора
 - * Высокие рабочие частоты преобразования
- DC/DC-преобразователи
 - * Высокие рабочие частоты преобразования
 - * Высокие характеристики встроенных диодов
- Тяговые инверторы
 - * Возможность короткого замыкания
 - * Самое низкое RdsA из имеющихся на рынке
 - * Самые низкие потери в данном объеме модуля

Рис. 1. Пример использования полупроводниковых приборов на основе SiC компании UnitedSiC в электромобиле Audi E Tron GT [4] и достигаемые при этом преимущества

¹Впервые цикл опубликован в Power Systems Design и доступен по ссылке: www.powersystemsdesign.com/articles/are-you-sic-of-silicon-part-1/22/14274

с уже встроенными в их корпуса диодами. Для удовлетворения этих потребностей полевые SiC-транзисторы уже доступны с квалификацией по требованиям стандарта AEC-Q101, что, собственно, и открывает им путь в автоиндустрию. В этой части статьи мы обсудим основные топологии и рассмотрим преимущества использования устройств на основе карбида кремния, особенно в системах с высоким напряжением аккумуляторной батареи (500–800 В).

Топологии, используемые во встроенных зарядных устройствах электромобилей

Поскольку бортовое или встроенное зарядное устройство (далее — ВЗУ) находится внутри автомобиля, то вполне понятно, что необходимо сокращать его объем и вес, используя топологию преобразователя, которая как максимизирует плотность мощности, так и обеспечивает высокую эффективность ее преобразования. Выбор топологии зависит в первую очередь от диапазона мощности, который в легковом пассажирском электромобиле может быть 6,6, 11 (как правило) или даже 22 кВт (как ближайший стандарт). В некоторых случаях ВЗУ может быть двунаправленным. Это означает, что такая схема не только позволяет заряжать аккумулятор от сети, но и непосредственно сам электромобиль может служить распределенным источником энергии, который возвращает энергию обратно в сеть. В данном режиме поток мощности меняется на противоположный, но пиковая рабочая мощность может быть ниже (как правило, наполовину) того, что может дать аккумулятор с текущим уровнем заряда.

Но для начала рассмотрим базовые решения. На рис. 2 показаны две конфигурации встроенных зарядных устройств, предназначенных для однонаправленного потока энергии. Схема имеет две основные секции, ступень выпрямителя от внешнего источника электроснабжения и ступень преобразовате-

Таблица. Сравнение параметров МОП-транзистора компании UnitedSiC и современного транзистора с суперпереходом (Super Junction)

| Параметр | Символ | UF3C065040K4S | Транзистор с суперпереходом |
|--|---------------|---------------|-----------------------------|
| Напряжение сток-исток, В | V_{DS} | 650 | 650 |
| Номинальный рабочий ток при $T_C = +100\text{ }^\circ\text{C}$, А | I_D | 40 | 29 |
| Сопротивление открытого канала при $T_J = +25\text{ }^\circ\text{C}$, мОм | $R_{DS(on)}$ | 42 | 40 |
| Сопротивление открытого канала при $T_J = +125\text{ }^\circ\text{C}$, мОм | $R_{DS(on)}$ | 59 | 80 |
| Сопротивление открытого канала при $T_J = +175\text{ }^\circ\text{C}$, мОм | $R_{DS(on)}$ | 58 | — |
| Сопротивление затвора при $f = 1\text{ МГц}$, Ом | R_G | 4,5 | 0,85 |
| Входная емкость ($V_{DS} = 100\text{ В}$, $f = 100\text{ кГц}$), пФ | C_{iss} | 1500 | 4640 |
| Выходная емкость ($V_{DS} = 100\text{ В}$, $f = 100\text{ кГц}$), пФ | C_{oss} | 200 | 70 |
| Эффективная выходная емкость, связанная с энергией ($V_{DS} = 400\text{ В}$), пФ | $C_{oss(er)}$ | 146 | 146 |
| Эффективная выходная емкость, связанная с временем ($V_{DS} = 400\text{ В}$), пФ | $C_{oss(er)}$ | 325 | 1630 |
| Энергия, накопленная в C_{oss} ($V_{DS} = 400\text{ В}$), мкДж | E_{oss} | 11,7 | 13,2 |
| Общий заряд затвора, нКл | Q_G | 43 | 93 |
| Прямое падение напряжения диода, В | V_{FSD} | 1,5 | 0,9 |
| Заряд обратного восстановления, нКл | Q_{rr} | 138 | 13 000 |

Примечание. T_C — температура окружающей среды; T_J — температура полупроводникового перехода.

ля постоянного тока одного уровня в другой. Ступень выпрямителя выпрямляет напряжение сети переменного тока для формирования шины постоянного тока с единичным коэффициентом мощности. Затем ступень DC/DC-преобразования с фазовым сдвигом и полным мостом обеспечивает точно контролируемый выход для быстрой зарядки аккумуляторной батареи. Во время зарядки литий-ионной батареи схема для зарядки работает сначала в режиме стабилизации тока, затем переходит в режим стабилизации мощности и, наконец, в режим стабилизации напряжения, в котором остается до тех пор, пока батарея не зарядится до установленного значения.

Для того чтобы повысить эффективность (в данном случае мы говорим о коэффициенте полезного действия — КПД) на стадии выпрямления, все более популярными становятся бездиодные топологии. Это связано с тем, что при их использовании можно избежать потерь проводимости на диодах выпрямительного моста. На рис. 2 также показана схема ККМ на основании двухтактной схемы с дросселем на входе (в англ. терминологии — Totem pole power factor corrector, TPFPC), которую можно использовать для более низких уровней мощности.

Схема может действовать в режиме непрерывной проводимости (continuous conduction mode, CCM) или в режиме критической проводимости (Critical Conduction Mode, CrCM). Преобразователи, работающие в режиме CrCM, имеют четыре активных переключателя, как показано на рис. 2. Из них два работают на высокой частоте преобразования и два на частоте сети электропитания. Что касается режима CCM, то здесь, как известно, включение ключа затруднено, и наилучшим вариантом является использование транзистора с широкой запрещенной зоной и диодами с малым зарядом обратного восстановления Q_{rr} .

В таблице приведены параметры устройства, включая ряд характеристик антипараллельных диодов полевых транзисторов UnitedSiC по сравнению с современными кремниевыми устройствами с суперпереходом (Super Junction). Для переключения частот выше 20 кГц, как уже было сказано, необходимо использовать ключи на транзисторах с широкой запрещенной зоной, при этом стандартный драйвер затвора, который может управлять МОП-транзисторами ком-

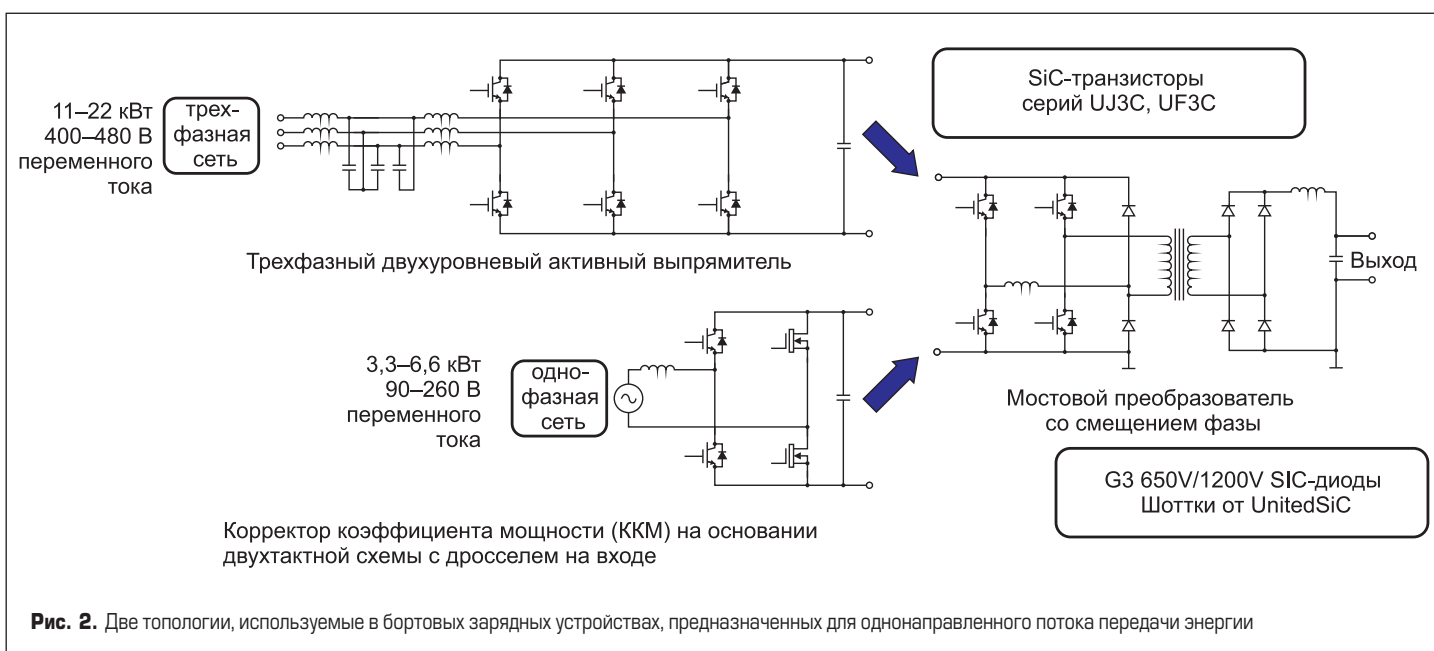


Рис. 2. Две топологии, используемые в бортовых зарядных устройствах, предназначенных для однонаправленного потока передачи энергии

пании UnitedSiC, упрощает переход от Super Junction-устройства к транзисторам UnitedSiC и модернизацию без переработки схемы управления ключами.

Транзистор UF3C065040K4 [5] — пример каскадного полевого транзистора компании UnitedSiC, который был подробно описан в [3]. Особенность этих транзисторов состоит в том, что в одном общем корпусе вместе с нормально открытым высокопроизводительным быстродействующим полевым SiC-транзистором с управляющим *p-n*-переходом (JFET F3) выполняется недорогой кремниевый (Si) МОП-транзистор с рабочим напряжением 25 В. Такой дополнительный транзистор предназначен для обеспечения нормального функционирования SiC-устройства, то есть создания нормально выключенного транзистора, упрощенного управления затвором и исключения защитного диода. Данное устройство легко применимо для замены имеющихся кремниевых МОП- и IGBT-транзисторов, а также может взаимозаменяемо использоваться с SiC-транзисторами всех типов. Серия UF3C демонстрирует очень быстрое переключение, выполнена в корпусе TO-247-4L и имеет в своей структуре диод с лучшими на сегодня характеристиками обратного восстановления по сравнению с транзисторами такого рабочего напряжения и тока. Устройства серии UF3C оптимальны для переключения индуктивных нагрузок и любого иного применения, требующего стандартного драйвера затвора.

Если используется режим CrCM, то пиковые токи становятся выше, что накладывает дополнительные ограничения на катушки индуктивности и требует более низкого сопротивления

ключей. Однако отсутствие жесткого включения позволяет в этом случае использовать кремниевые полевые транзисторы с суперпереходом, по крайней мере при низких напряжениях шины. Но даже в этой ситуации использование полевых SiC-транзисторов имеет смысл из-за наличия коммерчески доступных вариантов с очень низким сопротивлением и растущей конкурентоспособной ценой относительно МОП-транзисторов с аналогичным сопротивлением открытого канала. Кроме того, при переходе на полевые SiC-транзисторы компании UnitedSiC с рабочим напряжением 1200 В (они выполняются в виде стека — подробно в [3]) топология может быть расширена до более высоких напряжений шины постоянного тока, что позволит увеличить выходную мощность с минимальным числом параллельно включенных транзисторов.

Что касается трехфазного двухуровневого активного выпрямителя, это отличный вариант для высоких уровней мощности, таких как 11 или 22 кВт. Напряжение на шине переменного тока в данном случае обычно составляет 600–800 В, что и требует использования транзисторов, рассчитанных на рабочее напряжение 1200 В. Кроме того, поскольку двухуровневая трехфазная схема, показанная на рис. 2, предполагает наличие ключей с низкими потерями на переключение и низким Q_{rr} диода, это опять-таки смещает выбор в сторону полевых SiC-транзисторов вместо IGBT.

На рис. 3 даны характеристики включения и отключения транзистора UF3C120040K4S UnitedSiC с сопротивлением открытого канала 35 мОм и рабочим напряжением сток-исток 1200 В. Как и UF3C065040K4, этот транзистор

выполнен в корпусе TO-247-4L. Благодаря очень низким потерям при включении и отключении эти транзисторы являются хорошим выбором для реализации активного выпрямителя с высоким КПД. Для получения большой мощности транзисторы могут без особых проблем включаться параллельно, а благодаря дополнительному выводу истока они могут предназначаться для управления по схеме Кельвина. Поскольку эта схема нейтрализует влияние паразитной индуктивности истока, то транзисторы, соответственно, будут переключаться быстрее, с меньшими потерями и более чистыми сигналами в цепи затвора, что упростит решение по уменьшению электромагнитных помех (ЭМП) и снимет вопросы по выполнению требований в части электромагнитной совместимости (ЭМС).

Альтернативный подход к выпрямителю — это использование схемы Виенна-выпрямителя (Vienna Rectifier) [7], показанной на рис. 4, которая для снижения стоимости позволяет использовать более дешевые кремниевые транзисторы с суперпереходом, рассчитанные на рабочее напряжение 650 В, но вместе с SiC-диодами Шоттки. В этой схеме транзисторы не подвергаются жесткому переключению, однако количество требуемых для ее реализации полупроводников больше, а падение напряжения на диодах ограничивает возможность достижения максимальной эффективности (КПД).

DC/DC-преобразователи

Как было показано на рис. 2, DC/DC-преобразователь — это такая рабочая лошадка, которая используется для зарядки аккумулятора

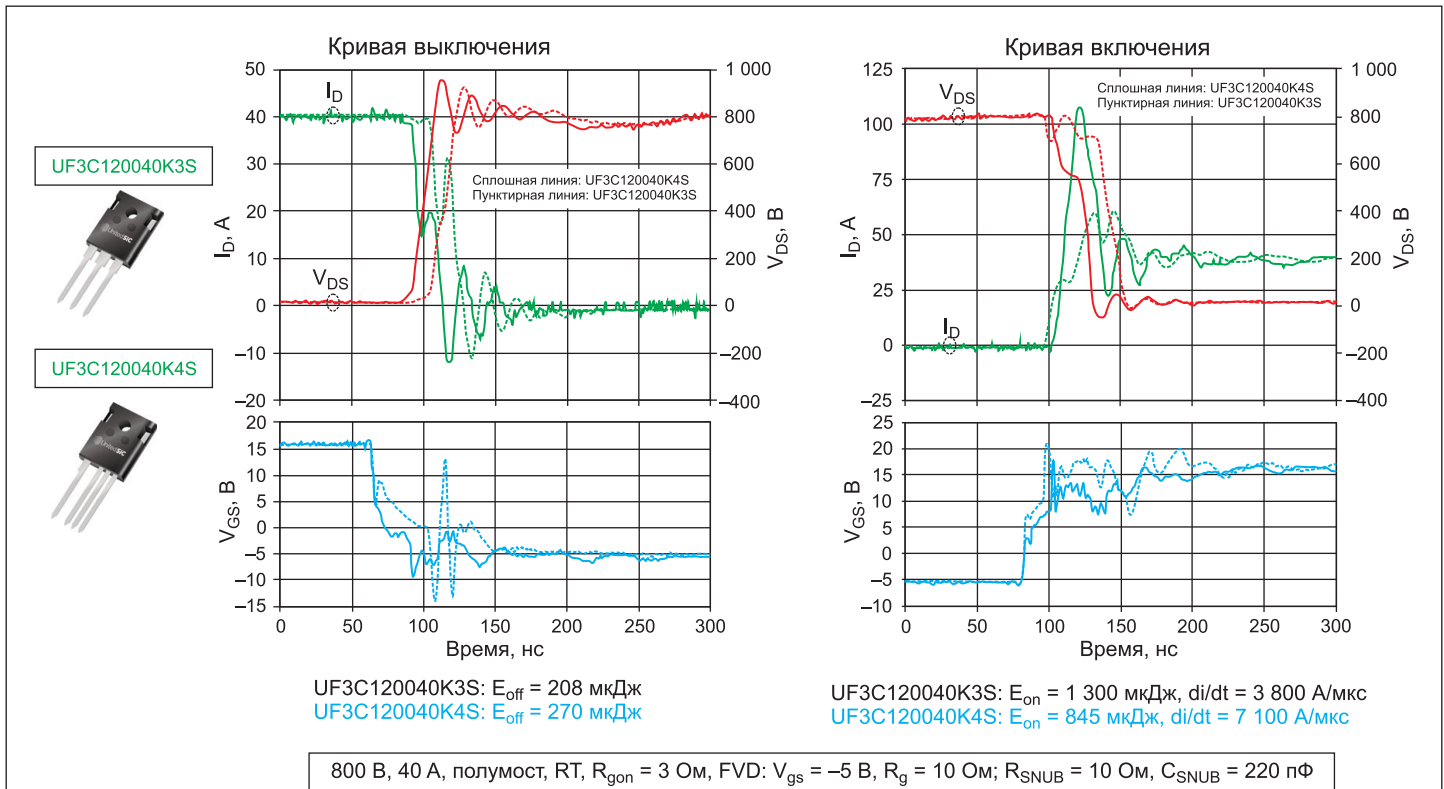


Рис. 3. Характеристики включения и выключения для быстрого полевого транзистора UF3C120040K4S компании UnitedSiC ($R_{DS(on)} = 35$ мОм, $V_{DS} = 1200$ В, корпус TO-247-4L) в сравнении с аналогичным транзистором UF3C120040K3S без вывода для организации включения по схеме Кельвина (корпус TO-247-3L)

и подачи питания напряжением 12/24 В и представляет собой мостовой преобразователь со смещением фазы. При полной нагрузке эта схема работает с переключением ключей при нулевом напряжении (zero-voltage-switching, ZVS), а потери при отключении сводятся к минимуму с помощью демпфирующего конденсатора. Данная схема может работать на высоких частотах (100–300 кГц) с хорошим КПД. Низкие потери проводимости и потери при отключении, присущие полевым SiC-транзисторам, делают их здесь идеальным выбором, тем более что их требования к драйверу затвора так же просты, как и для обычных МОП-транзисторов. Все сказанное относится к каскодным полевым транзисторам UnitedSiC, которые могут управляться напряжением 0–12 В или работать от простого импульсного изолированного преобразователя с трансформатором, который выдает напряжение –12/0/12 В. Однако в условиях малой нагрузки может произойти жесткое переключение, что делает применение полевых транзисторов проблематичным, поскольку они в этом случае более склонны к отказам, вызванным восстановлением диодов, а схемы с GBT подвержены повышенным потерям.

Хорошим выбором здесь становится топология LLC (индуктивность-индуктивность-емкость), показанная на рис. 5. Особенно это очевидно в случае, когда выходное напряжение фиксировано. Такая топология чаще всего встречается в DC/DC-преобразователях с фиксированным выходом, тогда как полный мост с фазовым сдвигом считается более подходящим для работы с переменным выходным напряжением. При более низких напряжениях шины в цепях коммутации LLC используются полевые

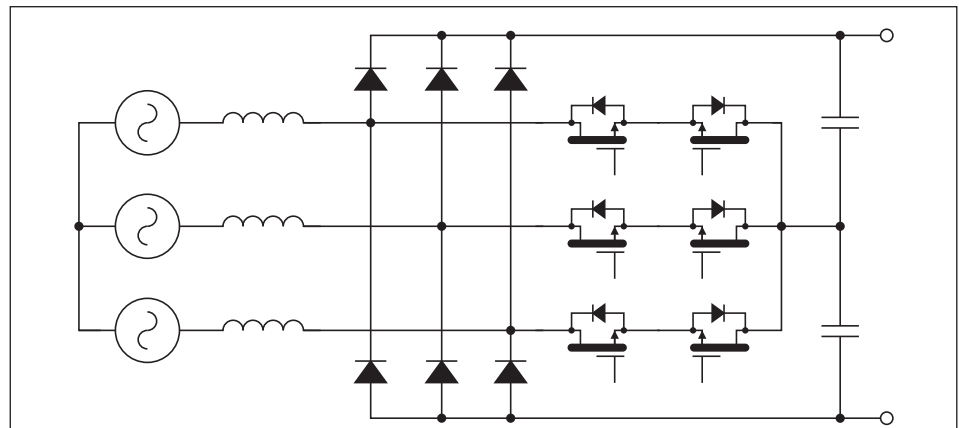


Рис. 4. Виенна-выпрямитель, который для снижения стоимости использует кремниевые МОП-транзисторы с суперпереходом, рассчитанные на рабочее напряжение 650 В, вместе с SiC-диодами Шоттки

транзисторы с быстрыми диодами. При этом из-за более высокого напряжения потери в IGBT становятся чрезмерными, и выбор здесь снова будет в пользу полевых SiC-транзисторов.

Даже при более низком напряжении на шине полевые SiC-транзисторы компании UnitedSiC с рабочим напряжением 650 В предлагают преимущества очень низкого заряда затвора, малого времени, требуемого для зарядки выходной емкости, и низких потерь проводимости открытого диода, что может использоваться для повышения рабочих частот LLC в пределах 100–500 кГц. Уже сейчас компания UnitedSiC готова поставить транзисторы в корпусах TO-247-4L с сопротивлением открытого канала от 7 мОм и рабочим напряжением 650 В [8]. Для применений с ограни-

чением по размещению доступен каскодный транзистор с сопротивлением 34 мОм и номинальным рабочим напряжением 650 В, выполненный в стандартном корпусе DFN8x8 [9].

Для двунаправленного DC/DC-преобразования, показанного на рис. 6, представлены схемы с двойным активным мостом (dual active bridge, DAB) и топологией CLLC (емкость-индуктивность-индуктивность-емкость), где на стороне выхода имеются активные коммутаторы. Для зарядки аккумулятора, поскольку выходное напряжение сильно варьируется, DAB может управляться с фиксированной шины постоянного тока путем изменения формы сигнала ШИМ затвора. Если применяется топология CLLC, то для поддержания работы вблизи резонанса для ступени DC/DC-преобразования

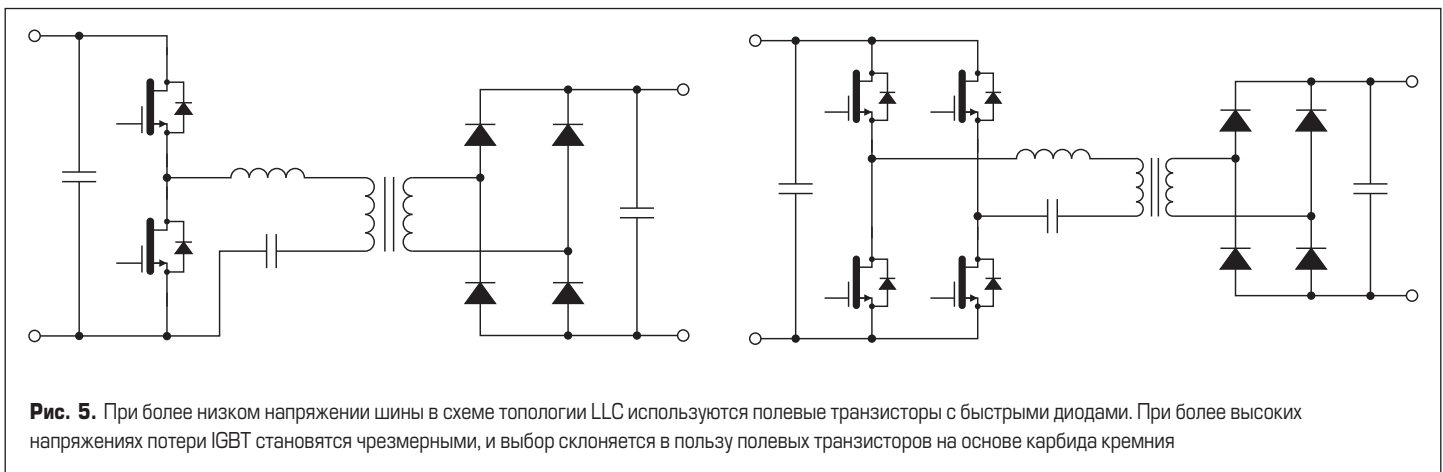


Рис. 5. При более низком напряжении шины в схеме топологии LLC используются полевые транзисторы с быстрыми диодами. При более высоких напряжениях потери IGBT становятся чрезмерными, и выбор склоняется в пользу полевых транзисторов на основе карбида кремния

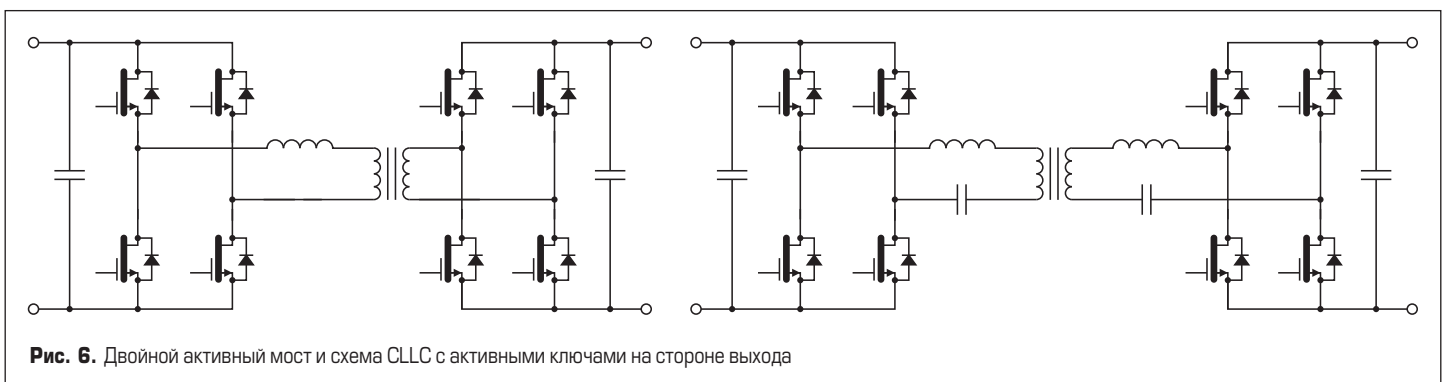


Рис. 6. Двойной активный мост и схема CLLC с активными ключами на стороне выхода

напряжение на шине должно изменяться путем изменения от схемы управления на ступени активного выпрямителя (ККМ с двухтактным каскадом или трехфазный двухуровневый активный выпрямитель). В любом случае для эффективного жесткого переключения в режиме инверсии возникает необходимость использовать на вторичной стороне полевые SiC-транзисторы. Для устройств зарядки электромобилей это могут быть полевые транзисторы с напряжением 650–1200 В. Однако для выходных напряжений 12/24 В могут применяться кремниевые полевые транзисторы с низким рабочим напряжением в пределах 100–150 В.

Облегчение перехода между транзисторами SiC- и Si-технологий

Благодаря присущей карбиду кремния широкой запрещенной зоне полевые SiC-транзисторы позволяют использовать улучшенные топологии и более высокие рабочие частоты преобра-

зования мощности для достижения ее высокой плотности и эффективности. Более высокая стоимость таких ключей применительно к электромобилям легко компенсируется увеличением эффективности (КПД) системы. Причем полевые транзисторы компании UnitedSiC обеспечивают ключевое преимущество совместимости со всеми типами напряжений управления затвора, поэтому их можно включать в конструкции на основе кремния, а также в конструкции SiC МОП-транзисторов без значительной переделки драйвера. Это облегчает переход для проектировщиков, поскольку они все чаще используют SiC-транзисторы, иногда просто для модернизации существующих конструкций, которые были выполнены на основе кремниевых ключей.

Что нас ждет в ближайшем будущем

Следующий этап развития карбид-кремниевых транзисторов, вероятно, будет предусматривать интегрирование драйвера

и полевого транзистора в такие решения, как система в корпусе, например в виде полумоста с драйвером, показанным на рис. 7, с использованием 35-мОм каскодных ключей в виде стека на рабочее напряжение 1200 В, как было рассмотрено в [3]. Формы сигнала переключения такого устройства показывают очень быстрое и чистое переключение, соответственно, его можно применять в качестве стандартного блока для всех вариантов схемы, описанных в этой статье.

Технология полевых SiC-транзисторов быстро совершенствуется, при этом есть надежды, что она существенно улучшит показатели качества, достигнутые в транзисторах 2020 года. В сочетании с усовершенствованиями дискретных корпусированных SiC-транзисторов и введением в практику интеллектуальных силовых модулей на их основе эти усовершенствования помогут еще больше увеличить плотность мощности, что положительно скажется на развитии электромобилестроения. Дополнительная информация по концепции мощного SiC-модуля со сверх-

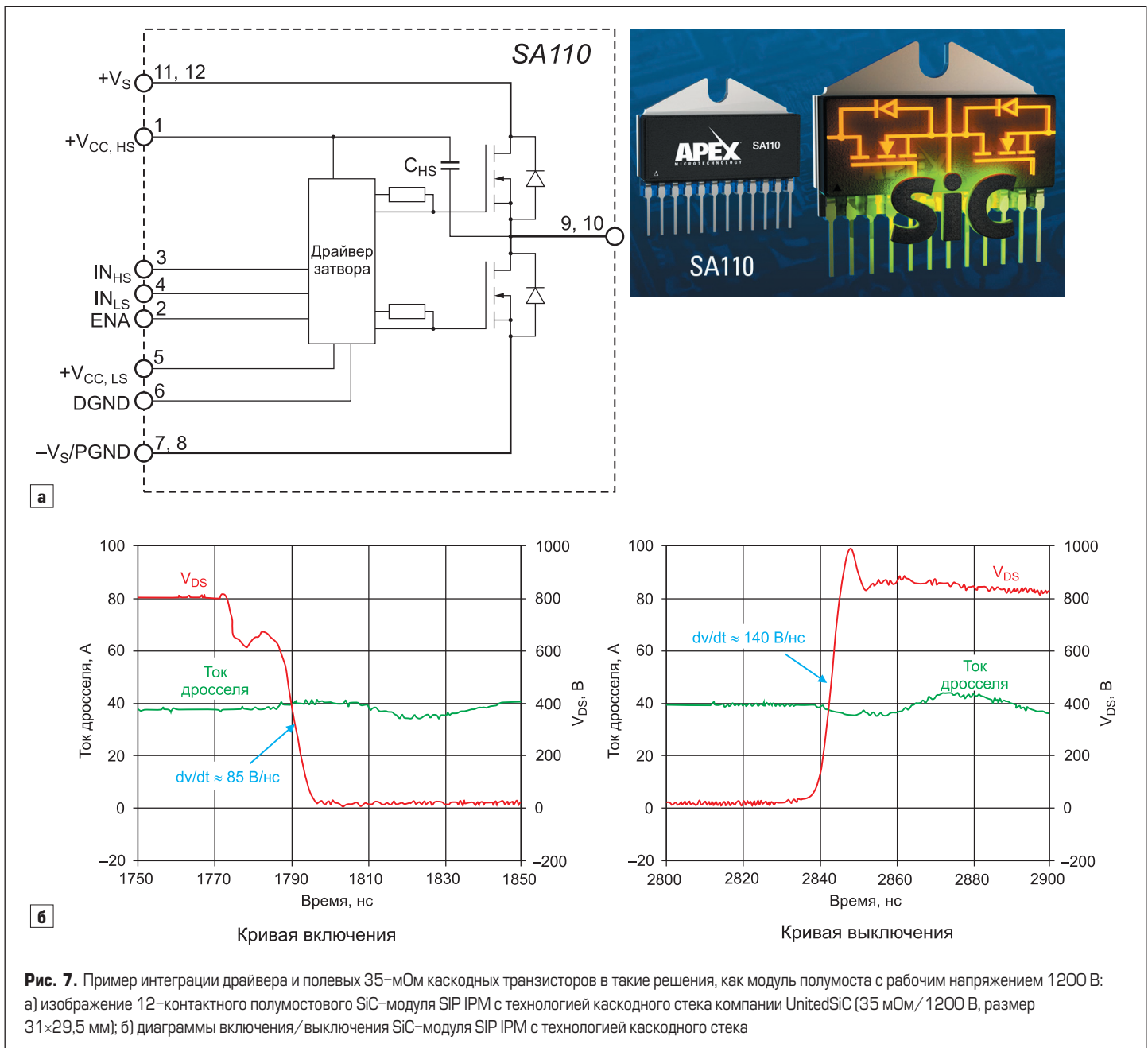


Рис. 7. Пример интеграции драйвера и полевых 35-мОм каскодных транзисторов в такие решения, как модуль полумоста с рабочим напряжением 1200 В: а) изображение 12-контактного полумостового SiC-модуля SIP IPM с технологией каскодного стека компании UnitedSiC (35 мОм/ 1200 В, размер 31×29,5 мм); б) диаграммы включения/выключения SiC-модуля SIP IPM с технологией каскодного стека

низкой коммутационной индуктивностью доступна по ссылке [10].

Заключение

В этой, третьей статье цикла мы постарались охватить целый ряд важных вопросов, кратко объяснив преимущества, которые можно увидеть с решениями на основе полевых SiC-транзисторов для их продвижения и использования в двух основных узлах современного электромобиля. Как можно видеть, SiC-транзисторы открывают пути для повышения плотности мощности и увеличения КПД зарядных устройств и повышения производительности DC/DC-преобразователей электромобилей, в том числе и двунаправленных. Улучшения достигаются за счет повышения рабочей частоты преобразования энергии и уменьшения потерь на включение/выключение. При этом полевые транзисторы компании UnitedSiC предлагают возможность их использования без значительной переработки уже существующих конструкций на основе кремния, что является важным преимуществом.

Следующая статья цикла предоставит информацию о применении полупроводниковых приборов рассматриваемой технологии в тяговых инверторах современных легковых электромобилей. Более подробную информацию по этим и другим вопросам применения SiC-транзисторов можно найти на веб-сайте компании UnitedSiC [11].

Литература

1. Bhalla A. Are you SiC of Silicon? Part 3. www.powersystemsdesign.com/articles/are-you-sic-of-silicon-part-3/22/14585
2. Бхалла А. Вы за SiC или кремний? Тенденции развития и проблемы применения SiC в приложениях. Часть 1 // Силовая электроника. 2020. № 1.
3. Бхалла А. Вы за SiC или кремний? Современные тенденции применения SiC-устройств и технологии корпусирования. Часть 2 // Силовая электроника. 2020. № 2.
4. Ауді Центр Віпос. www.audi.kiev.ua/novini/aktualni-novini/audi-e-tron-gt-conzept-tretyi-peredseriyiy
5. UF3C065040K4S 650V-42mΩ SiC Cascode, DATASHEET Rev. A, January 2019. United Silicon Carbide, Inc. www.unitedsic.com/datasheets/DS_UF3C065040K4S.pdf
6. UF3C120040K4S 1200V-35mΩ SiC Cascode, DATASHEET Rev. A, January 2019, United Silicon Carbide, Inc. www.unitedsic.com/datasheets/DS_UF3C120040K4S.pdf
7. Чаплыгин Е., Во Минь Тьинь, Нгуен Хоанг Ан. Виенна-выпрямитель — трехфазный корректор коэффициента мощности // Силовая электроника. 2006. № 1.
8. UF3C/SC SiC FETs Selector Guide. www.unitedsic.com/group/uf3c-sc-sic-fets/
9. UF3SC065030D8S 650V-34mΩ SiC FET, Rev. B. January 2020, United Silicon Carbide, Inc. www.unitedsic.com/datasheets/DS_UF3SC065030D8S.pdf
10. Роеблиц М. (Martin Roebnitz), Спенг М. (Matthias Spang). Концепция мощного SiC-модуля со сверхнизкой коммутационной индуктивностью // Силовая электроника. 2018. № 2.
11. www.unitedsic.com