

Вы за SiC или кремний?

Часть 2. Современные тенденции применения SiC-устройств и технологии корпусирования

Это вторая статья, продолжающая цикл из шести статей [1], в которых будут рассмотрены преимущества и проблемы изготовления и применения полупроводниковых приборов на основе карбида кремния (SiC). Цель цикла — дать систематизированные общие сведения по этой относительно новой, но уже вполне заслуженно завоевывающей популярность технологии и области ее применения. Первая часть цикла в авторском переводе доступна по ссылке [2]¹.

Ануп Бхалла (Anup Bhalla)

**Перевод и дополнения:
Владимир Рентюк**

Давно известно, что технология корпусирования является ключом к раскрытию полного потенциала устройств на полупроводниках с широкой запрещенной зоной (wide-bandgap, WBG). Производители устройств на основе карбида кремния быстрыми темпами улучшают их качественные характеристики, такие как приведенное сопротивление открытого канала на единицу площади кристалла, одновременно уменьшая емкости, влияющие на скорость переключения. Дело движется, и уже сейчас такие устройства в дискретном исполнении выпускаются в новых корпусах, которые позволяют пользователям лучше реализовать их характеристики быстрого переключения. При этом модули также не стоят в сторонке. Стандартные модули становятся все более доступными, и новые передовые технологии применяются для увеличения технической ценности продукта на основе карбида кремния именно за счет присущего ему быстрого переключения, более низкого теплового сопротивления и высокой надежности.

Технология SiC-диодов Шоттки

Что касается SiC-диодов Шоттки, на момент написания данной статьи они составляют более 50% продаж устройств этой технологии. В основном они популярны в диапазонах номинальных рабочих напряжений 650, 1200 и 1700 В. Диоды на основе SiC с рабочим напряжением 650 В успешно применяются в схемах коррекции коэффициента мощности (ККМ) в источниках питания компьютеров, серверов и в области телекоммуникации, а также во вторичных выпрямителях в зарядных устройствах высокого напряжения. Диоды с рабочим напряжением 1200 и 1700 В используются в самом широком спектре конечных приложений, обслуживающих повышающие

преобразователи в системах преобразования энергии в солнечной энергетике, инверторах, сварочных аппаратах и источниках питания промышленного назначения.

Преимущество SiC-диодов Шоттки по сравнению с кремниевыми диодами с быстрым восстановлением в том, что первые характеризуются значительно более низким зарядом обратного восстановления Q_{RR} , и, следовательно, это позволяет сократить потери на включение E_{ON} в транзисторных ключах для полумостовых схем или прерывателях (чопперах), работающих в режиме непрерывной проводимости с жестким переключением. Поскольку обычные диоды Шоттки имеют проблемы из-за лавинного пробоя и в условиях всплеска прямого напряжения, то большинство производителей предлагают такие диоды, в которых для их защиты от сильных электрических полей добавляется $p-n$ -переход. Это уменьшает токи утечки и улучшает устойчивость к лавинному пробоя. Кроме того, введение биполярной инжекции в виде $p-n$ -перехода в условиях перенапряжения снижает и прямое падение напряжения.

В целом, SiC-диоды имеют значительно меньшую устойчивость к импульсному воздействию, чем кремниевые диоды с быстрым восстановлением, о чем их производители часто умалчивают. Во многом это связано с большим падением напряжения в условиях импульсного воздействия высокого напряжения, которое может составлять всего 1–2 В для кремния, но способно достигать 4–6 В для SiC. Поскольку площадь кристалла SiC-диода намного меньше, чем у его кремниевого собрата, это также создает и проблемы перегрева перехода. Для того чтобы уменьшить падение напряжения в рабочем состоянии и уменьшить тепловое сопротивление, производители используют процесс утонения пластины. Для утонения применяются процессы шлифования, травления и полировки. Кроме того, для минимизации теплового сопротивления и предотвращения

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

плавления в условиях импульсного воздействия, типичных для традиционных паяных соединений, производители используют усовершенствованные конструктивные решения в части крепления кристаллов в корпусах типа ТО и DFN, например, такие как установка полупроводникового кристалла на подложку путем спекания серебра. Это помогает обеспечить адекватную импульсную способность в пределах 8–12-кратного превышения номинального тока.

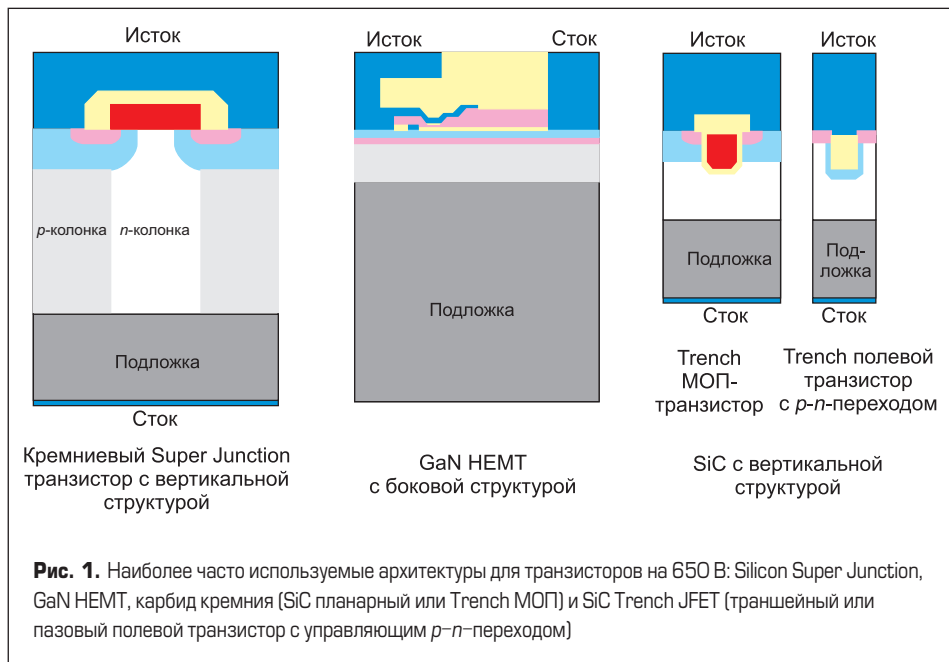
Что касается коммерческой доступности и номинальных значений тока, то, например, для использования в силовых модулях компания UnitedSiC предлагает диоды с номинальным током 100 А при рабочем напряжении 1200 В и 200 А с напряжением 650 В. В части дискретных решений компанией UnitedSiC предлагается широкий ассортимент не содержащих свинца, экологически чистых диодов с установкой кристалла путем спекания серебра. Эти диоды соответствуют требованиям стандарта AEC-Q101 «Stress Test Qualification for Automotive Grade Discrete Semiconductors», что открывает им возможности для использования в автомобильной промышленности.

Технология SiC-транзисторов

На рис. 1 показаны основные структуры устройств, которые доминируют на рынке высокопроизводительных полевых транзисторов с рабочим напряжением 650 В и используются для преобразования мощности.

Большинство из представленных на рис. 1 силовых транзисторов являются вертикальными, что обеспечивает место для сильноточных электродов, а GaN HEMT-транзисторы благодаря тому, что они являются боковыми устройствами, имеют оба силовых электрода на верхней поверхности. Из представленных решений только нитрид-галлиевые (GaN) транзисторы с высокой подвижностью электронов — HEMT (High electron mobility transistor) являются единственным боковым устройством с обоими силовыми терминалами, выполненными на верхней поверхности кристалла (полупроводниковой пластины).

В кремниевых транзисторах с так называемым суперпереходом — Super Junction (впервые технология применена компанией Infineon в 1998 году) используется принцип баланса заряда, при котором равное легиро-

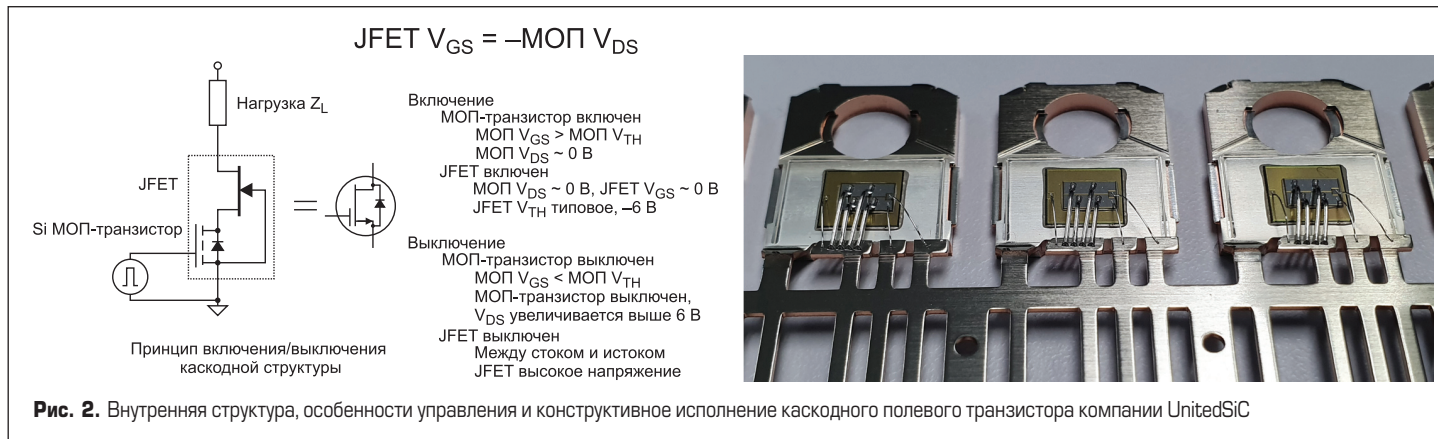


вание n- и p-области, выполненное в виде вертикальных структур (колонок), практически приводит к нулевому суммарному заряду и поэтому для поддержки напряжения может обеспечить быстрое его истощение, причем даже тогда, когда для достижения низкого сопротивления n-каналы высоколегированы.

Между 2000 и 2018 гг. добавление на единицу площади большего числа таких вертикальных n-каналов позволило снизить сопротивление при включении почти в 10 раз по сравнению с традиционным пределом для кремния без такого баланса заряда. Технология кремниевых транзисторов Super Junction обеспечивает ежегодный объем продаж таких устройств в объеме более \$1 млрд и поддерживает значение приведенного сопротивления на единицу площади кристалла (R_{dsA}) на уровне 8 мОм/см² для лучших в этом классе транзисторов на переднем крае, но большая часть поставщиков предлагает транзисторы с 12–18 мОм/см². В настоящее время доступны GaN HEMT с отличными характеристиками переключения, при этом их R_{dsA} находится в диапазоне 3–6 мОм/см². Эти боковые устройства построены на кремниевых подложках, которые намного дешевле, чем SiC-подложки, однако сегодня GaN-решения еще остаются более дорогими, нежели Si-устройства.

Также на рабочие напряжения 650 В предлагаются SiC-транзисторы технологии Trench (с траншейной структурой затвора, иногда, что не вполне верно, называемой траншейной, — кристалл такого транзистора содержит вертикально расположенный затвор и слой, блокирующий носители, далее — Trench) и планарные MOP-транзисторы, с R_{dsA} в диапазоне 2–4 мОм/см². Полевые транзисторы технологии Trench компании UnitedSiC второго поколения, например UJC06505K, достигли значений R_{dsA} , равных 0,75 мОм/см². Это означает, что кристалл таких SiC-устройств может быть сделан в 7–10 раз меньше, чем для структур на основе нитрида галлия или у SiC MOP-транзисторов. Это становится особенно важным, если одной из целей является достижение паритета цены с кремнием.

В полевых транзисторах компании UnitedSiC для формирования устройства, которое можно использовать вместе с любым нормально выключенным полевым MOP-транзистором, IGBT- или SiC MOP-транзистором, используется каскодная структура, показанная на рис. 2. Здесь, для достижения поставленной цели в одном общем корпусе вместе с нормально открытым SiC полевым транзистором с управляющим p-n-переходом (далее —



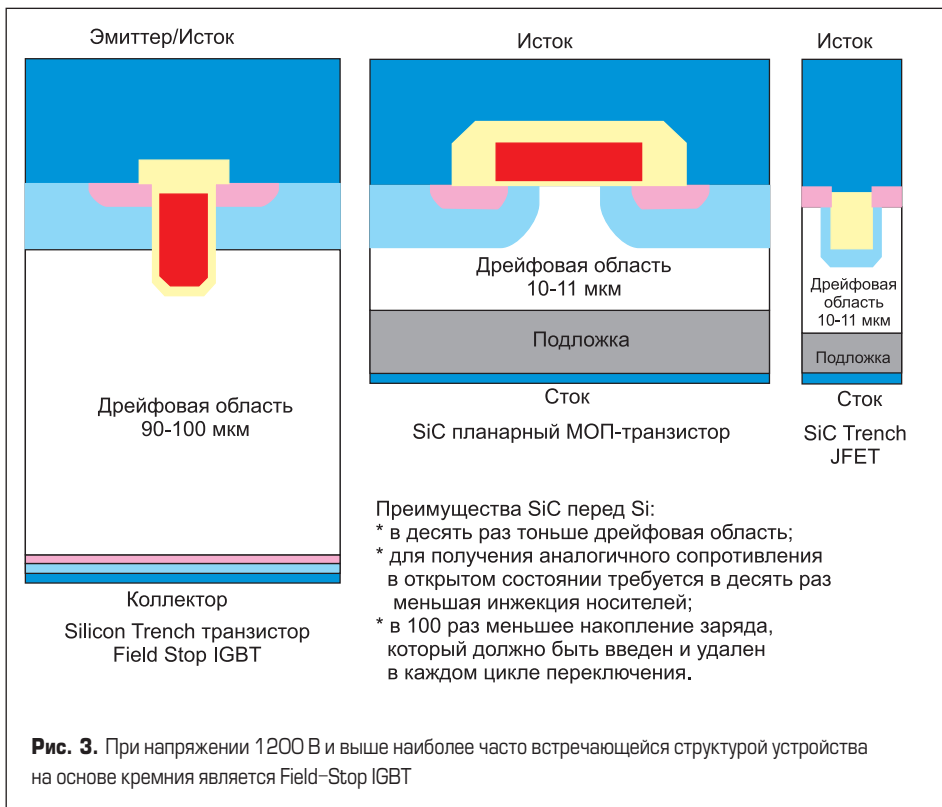


Рис. 3. При напряжении 1200 В и выше наиболее часто встречающейся структурой устройства на основе кремния является Field-Stop IGBT

JFET), выполняется недорогой кремниевый (Si) МОП-транзистор с рабочим напряжением 25 В. Этот дополнительный транзистор предназначен для обеспечения нормального функционирования SiC JFET, то есть создания нормально выключенного транзистора, упрощенного управления затвором и исключения защитного диода. Устройство может быть применено для замены уже имеющихся кремниевых МОП- и IGBT-транзисторов, а также взаимозаменяемо использоваться с SiC МОП-транзисторами всех типов.

На рис. 3 сравниваются структуры IGBT-, SiC МОП- и Trench JFET-транзисторов. Как известно, IGBT — это биполярные устройства, которые включаются порогом в 0,7 В, после чего сопротивление широкого блокирующего напряжение слоя снижается путем инжекции в него носителей заряда. Поскольку эти заряды, чтобы вернуть устройство в состояние блокировки (простыми словами — запретить), должны быть удалены, то неизбежны потери при переключении, которые намного больше, чем потери, имеющие место в SiC

МОП-транзисторах. Что касается каскодных транзисторов компании UnitedSiC, благодаря карбиду кремния они обеспечивает самое низкое сопротивление на единицу площади и могут быть напрямую использованы вместо IGBT даже без изменений в драйвере затвора, а также они имеют преимущества в части эффективности (КПД). Как объяснялось в предыдущей статье [2], отсутствие перегиба вольт-амперной характеристики (и, следовательно, проводимости) SiC МОП-транзисторов и SiC каскодных полевых транзисторов приводит к повышению эффективности даже в относительно низкочастотных приложениях.

Конкурирующие с Si Field-Stop IGBT-структуры, а именно SiC МОП и SiC Trench JFET, на рис. 3 показаны справа. Устройства на основе карбида кремния используют в 10 раз более тонкие блокирующие напряжение слои, со в 100 раз более высокими уровнями легирования, что обеспечивает низкое сопротивление канала в открытом состоянии. В свою очередь кремниевые IGBT понижают свое сопротивление, вводя накопленный заряд во включенное состояние, которое необходимо добавлять и удалять в каждом цикле переключения.

На рис. 4 более подробно рассматриваются различные альтернативы SiC-транзисторов, представленных на рынке. Большинство поставщиков предлагают планарные SiC МОП-транзисторы, однако некоторые предлагают еще и транзисторы технологии Trench. Все SiC МОП страдают от плохой подвижности носителей в канале (примерно в 15–30 раз хуже, чем у кремния), но Trench МОП-транзисторы выигрывают из-за ориентации канала в кристалле. В свою очередь, Trench JFET имеют объемный канал с гораздо более высокой подвижностью, что приводит к более низкому сопротивлению на единицу площади в устройствах с рабочими напряжениями 650–1700 В.

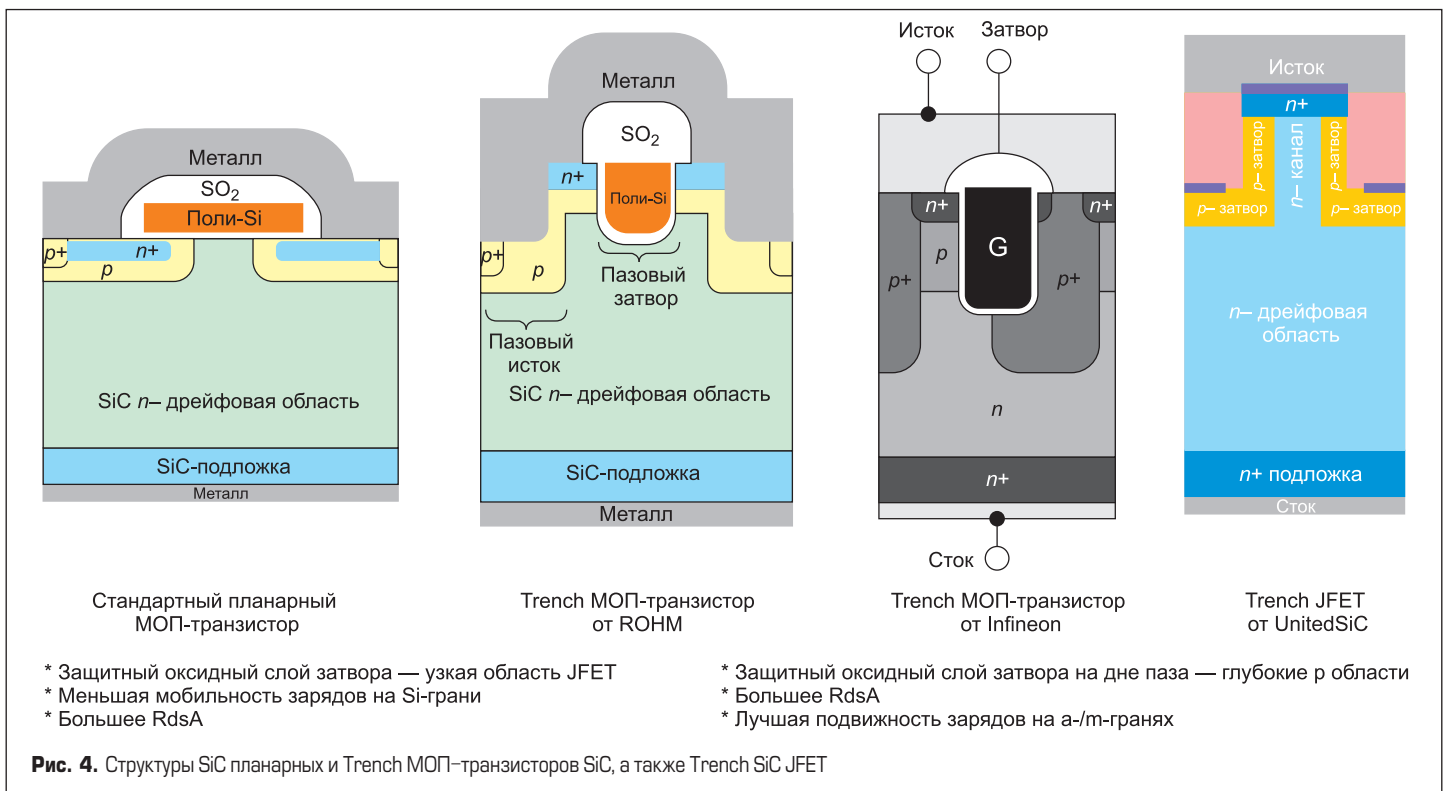


Рис. 4. Структуры SiC планарных и Trench МОП-транзисторов SiC, а также Trench SiC JFET

Как видно на рис. 4, МОП-транзисторы имеют индуцированный под оксидом затвора канал и управляются приложенным к затвору напряжением. Канал JFET открыт без приложения напряжения и закрывается обратным смещением *p-n*-перехода затвористок. Низкое сопротивление Trench JFET является следствием более объемного канала, и для них нет необходимости защищать затвор оксидом от воздействия полей высокой напряженности.

Для того чтобы более полно понять рис. 4, необходимо сделать одно отступление. Такой материал, как 4H-SiC, имеет гексагональную элементарную ячейку (рис. 5) с полярными и неполярными гранями, поскольку в зависимости от ориентации кристалла на его поверхность выходят или атомы Si, или атомы C (полярные Si-грань и C-грань), либо и те и другие в равном количестве (неполярные а-грань и m-грань). Это определяет анизотропию некоторых электрофизических свойств 4H-SiC, а также зависимость свойств поверхности кристалла от его кристаллографической ориентации [3].

Обычно SiC-устройства работают при напряженности электрического поля в 10 раз большей, чем у кремниевых устройств, что обусловлено более тонкими (в 10 раз) слоями, на которых они построены. В устройствах с объемным каналом, таких как SiC JFET, в отличие от кремниевых МОП-транзисторов, высокое напряжение на границе оксид/SiC не является особой проблемой. Тем не менее и для них есть определенные пределы, так что данному вопросу требуется все же уделить особое внимание, и недопустимо высоких уровней напряжения следует избегать. Это связано с тем, что такие воздействия на оксидный слой могут вызвать одиночные дефекты, приводящие к временной деградации, что сократит срок службы транзистора или приведет к чрезмерной частоте отказов. И хотя для плоскостных и траншейных JFET это не проблема, управление этим полем путем защиты оксида затвора с помощью экранирования неизбежно ведет к увеличению сопротивления канала в открытом состоянии.

В настоящее время сопротивления SiC JFET настолько низки, что SiC-подложка, на которой построено устройство, обеспечивает более 50% сопротивления в классе 650 В и 30–40% в классе 1200 В. По этой причине пластины при начальной толщине 350 мкм уменьшают до 100–150 мкм, а для формирования заднего контакта используется запатентованный метод с применением лазера. Ожидается, что расширение технологии и улучшение конструкции ячеек приведет к дальнейшему снижению сопротивления на единицу площади кристалла почти до фантастических 0,5 мОм/см² при 650 В и 1 мОм/см² при 1200 В. Поэтому вполне вероятно, что сокращение затрат на SiC, обусловленное быстро растущими объемами, может и в дальнейшем снижаться благодаря описанным технологическим усовершенствованиям.

Большая часть производства сегодня выполняется на 6-дюймовых пластинах, однако имеются прогрессивные тенденции и для получения 8-дюймовых пластин. Кроме того,

теперь доступны и отдельные устройства с номинальным током в диапазоне 100–200 А. В настоящее время компания UnitedSiC выпускает каскодный транзистор рабочим напряжением 1200 В на кристалле размером 5,7×6,3 мм с сопротивлением канала в открытом состоянии 9 мОм·с, а также транзистор с рабочим напряжением 1700 В на кристалле размером 8×8 мм с сопротивлением 5,7 мОм. Эти высококачественные устройства могут упростить модули, уменьшив количество устройств, которые должны быть подключены параллельно.

Технология корпусирования

Устройства на основе карбида кремния предлагаются как в виде дискретных решений, так и в виде модулей для приложений, требующих высоких уровней мощности. Сегодня на рынке доминируют дискретные силовые устройства, однако наблюдается тенденция и к более широкому использованию модулей. На рис. 6 показаны варианты дискретных корпусов, доступных для карбид-кремниевых диодов и транзисторов. Компания UnitedSiC для того, чтобы предоставить разработчикам силовых схем все необходимые им для удовлетворения системных ограничений варианты исполнения, быстро добавляет новые типы корпусов. Почти все эти корпуса хорошо известны, они стандартны в отрасли и широко используются с кремниевыми устройствами. Однако, несмотря на то, что форм-фактор пакета остается неизменным, можно сделать много внутренних усовершенствований, чтобы эффективнее использовать возможности SiC-устройств.

В дискретной форме доступны устройства с рабочим током 2–200 А. Кроме обычных корпусов, для SiC-транзисторов используются и корпуса с дополнительным выводом истока (с выводом для схемы подключения Кельвина), поскольку в этом случае обеспечивается их намного более быстрое переключение.

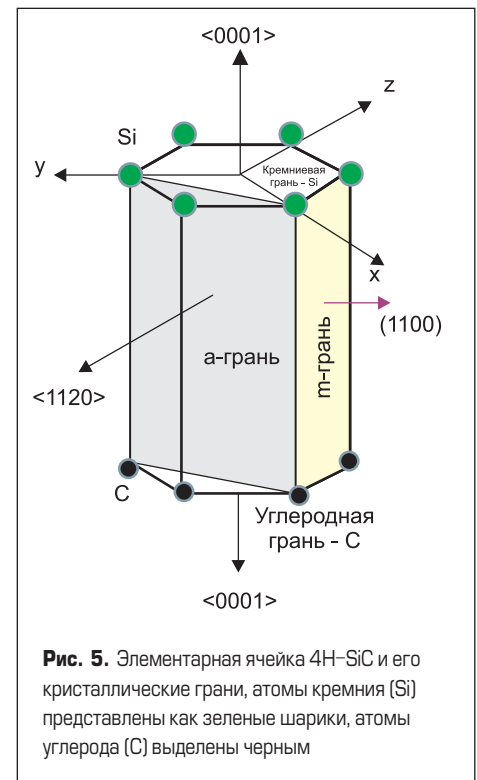
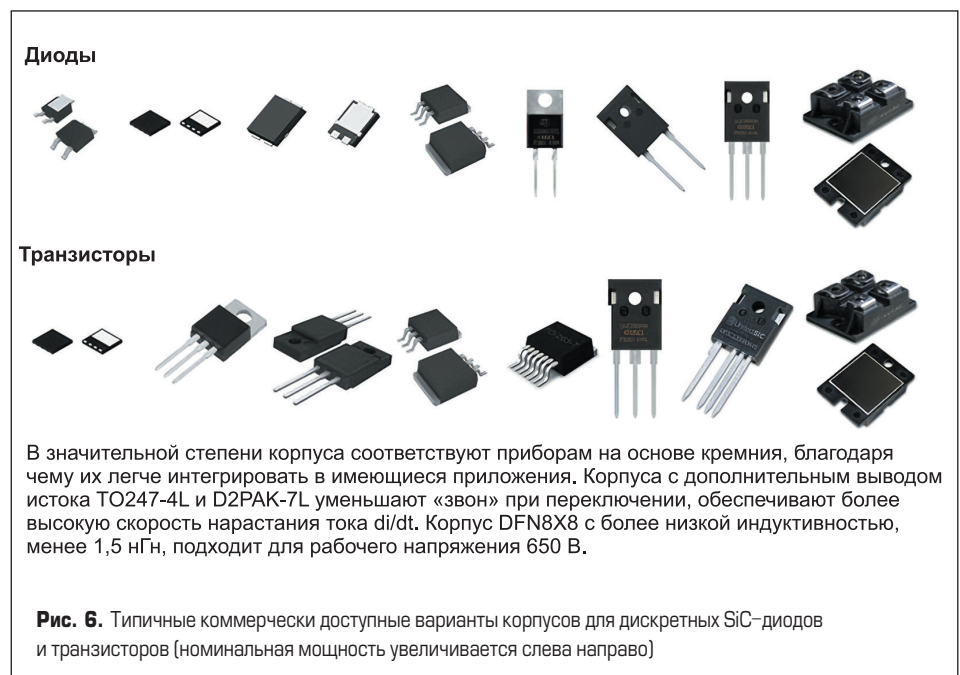
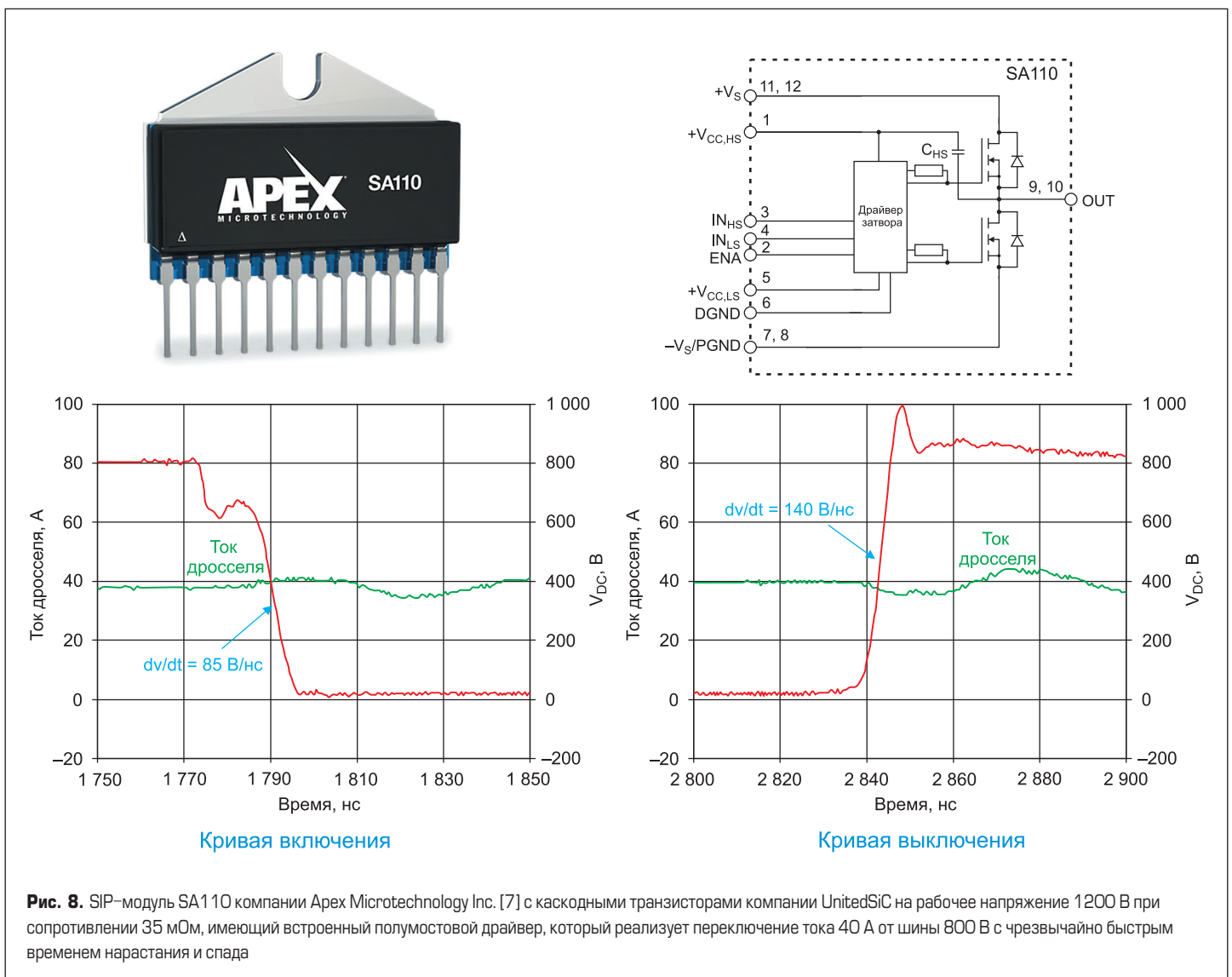
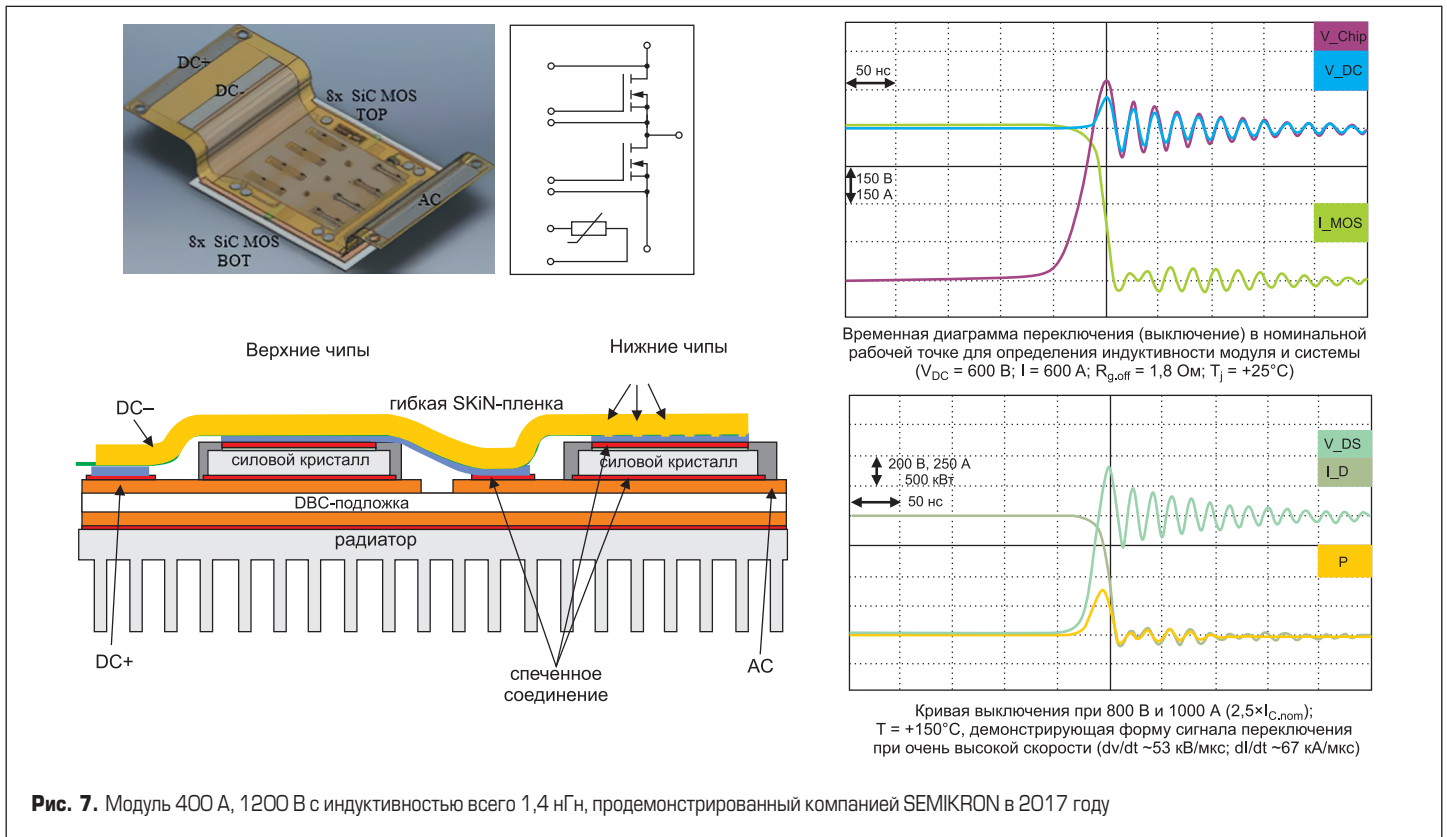


Рис. 5. Элементарная ячейка 4H-SiC и его кристаллические грани, атомы кремния (Si) представлены как зеленые шарики, атомы углерода (C) выделены черным

Недавнее освоение SiC-устройств в корпусах TO247-4L, D2PAK-7L и DFN8×8 помогает преодолеть определенные проблемы драйвера затвора, которые связаны с быстрым переключением и наблюдаются в корпусах более известных типов, таких как D2PAK-3L, TO220-3L и TO247-3L, имеющих большую индуктивность общего вывода истока. В то время как традиционные корпуса с тремя выводами считаются рабочей лошадкой в отрасли, переход на корпуса с дополнительным выводом истока уже идет полным ходом, поскольку они обеспечивают более чистое и быстрое переключение с минимальным или нулевым влиянием на стоимость.

Что касается каскодных устройств, обычно они имеют ограниченную управляемость





переходного процесса при отключении путем изменения сопротивления затвора, особенно если возникающее при этом более длительное время задержки мешает должной работе схемы. Для этого компания UnitedSiC предлагает устройства с разными диапазонами скоростей переключения (серии UJ3C и UF3C, предварительно настроенные на определенную максимальную скорость).

Если схема имеет проблемы от чрезмерных скачков напряжения или звона в контуре питания, то очень эффективны будут небольшие демпфирующие RC-устройства, характеризующиеся минимальными потерями. Для того чтобы помочь пользователям в решении проблем по управлению затворами и выбору демпфера, на веб-сайте компании UnitedSiC доступен соответствующий руководящий материал в виде Application Note [4]. В нем даны рекомендации, которые помогут легко и просто решить эту проблему и проблему управления затвором в конечном проекте.

Технология корпусирования SiC-устройств, учитывая увеличение плотности тока по сравнению с кремниевыми, также совершенствуется, что связано с необходимостью работы с большими токами истока. К числу основных методов, используемых для продления срока службы мощных SiC-транзисторов как в дискретном, так и в модульном исполнении, относится применение алюминиевой ленты, подключение путем прижима медной толстой проволокой с помощью медного буфера, и корпуса без перемычек с применением прижимных медных контактов. Ожидается, что в будущем корпусирование также позволит улучшить конструктивные решения, направленные на снижение собственной индуктивности. Вполне возможно, что при минимизации индуктивности для повышения эффективности и увеличения скорости переключения в корпуса будут добавлены драйверы и конденсаторы.

В настоящее время на рынке появляется и широкий спектр силовых модулей, от более мелких, таких как Easy-1B/2B, до более крупных модулей со стандартным расположением выводов типа IGBT-модулей, в том числе модули 34 и 62 мм и модули типа EconoDUAL. Для инверторов солнечных батарей оптимизируется целый ряд SiC-технологий, от модулей гибридного типа с игольчатыми радиаторами до двухсторонних вариантов охлаждения. На рис. 7 показан модуль со сверхнизкой собственной индуктивностью, предложенный компанией Semikron, способный очень быстро переключаться с управляемыми перегрузочными напряжениями.

Приведенная на рис. 7 конструкция модуля с малой собственной индуктивностью дает возможность увеличить скорость переключения SiC-транзисторов близко к теоретической и обеспечивает высокую производительность, что приводит к улучшению характеристик конечного приложения и снижению затрат уже на системном уровне. Достичь таких результатов позволило применение специальной топологии SKiN и разнесение цепей отрицательной и положительной DC-шины на верхний и нижний слои. Общее значение коммутационной индуктивности модуля находится на уровне 1,4 нГн, при этом его конструктив соответствует промышленным

стандартам по изоляционным зазорам для полупроводниковых ключей 17-го класса. Это стало возможным благодаря разработке и внедрению новой концепции DC-интерфейса на основе параллельных полосковых линий и прижимных стоек, обеспечивающих требуемые зазоры вне контактной системы [6].

На рис. 8 показан SIP-модуль (система в корпусе), предлагаемый компанией Apex Microtechnology, который содержит драйверы полумоста и полевые транзисторы и связанные с ними высокоскоростные сигналы включения и выключения с использованием каскодных транзисторов компании UnitedSiC с сопротивлением 35 мОм, рассчитанных на рабочее напряжение 1200 В. Предусмотренные в модуле SA110 технические усовершенствования при использовании компактных высокопроизводительных устройств в высокочастотных приложениях упрощают применение в них высокоскоростных транзисторов и обеспечивают значительную экономию на уровне системы за счет сокращения пассивных компонентов.

Всегда предполагалось, что SiC-устройства окажут большое влияние на развитие тех или иных приложений при более высоких напряжениях. В настоящее время выпускаются и коммерчески доступны первые модули на 3300 и 6500 В, выполненные в типоразмере XHP, и уже вскоре появятся модули на рабочее напряжение в 10 кВ. Компания UnitedSiC использует уникальный подход к созданию высоковольтных транзисторов с использованием метода Supercascode (суперкаскодный), в котором для создания устройств с более высоким напряжением транзисторы с низким сопротивлением и рабочим напряжением в 1700 В соединены последовательно. При этом все они управляются одним полевым транзистором в нижней части цепочки. Этот подход, как было показано в [1, 2], является достаточно масштабируемым и позволяет без применения высоковольтных кристаллов создать модули с рабочими напряжениями от 3300 В и вплоть до 20 кВ. Такое решение особенно полезно в высоковольтных твердотельных автоматических выключателях, а также для реализации полупроводниковых преобразователей, подключаемых к электросети среднего напряжения.

Заключение

В этой, второй статье цикла мы постарались охватить целый ряд важных вопросов, кратко объяснив преимущества, которые можно увидеть в решениях на основе полевых и планарных полевых транзисторов технологии SiC для самого широкого спектра применений. Были рассмотрены технологии диодов и транзисторов, выполненных на основе карбида кремния и их корпусирование. Более подробную информацию по этим вопросам можно найти на веб-сайте компании UnitedSiC (доступны публикации типа Application Note, White Paper, а также практические примеры, блог и видео) и в представленных компанией публикациях интернет-изданий, например в [5], в том чис-

ле и в русскоязычных переводах [6], напечатанных в журнале «Силовая электроника». Полевые транзисторы SiC не только улучшают конструкцию изделий для высокочастотных приложений постоянного и переменного тока, но именно полевые транзисторы компании UnitedSiC предлагают возможность их установки без значительной переработки в существующие конструкции на основе кремния.

Развитие SiC-устройств и технологии их корпусирования продолжает прогрессировать, что способствует росту признания на рынке целого ряда конечных приложений, требующих высоких скоростей переключения. Это подтолкнет разработку новых продуктов на широкозонных полупроводниках в целом ряде самых различных направлений: от высокоскоростных коммутируемых устройств для преобразования напряжения постоянного тока, встроенных зарядных устройств электромобилей и блоков питания серверов до модулей с очень низкими потерями проводимости для инверторов солнечных батарей. Большое количество систем следующего поколения, в которых используются улучшенные возможности широкозонных устройств, находится в процессе реализации, и вскоре рынок увидит совершенно новый уровень производительности и эффективности, основанный на SiC-технологии.

Следующая статья этого цикла предоставит еще больше информации о полупроводниковых приборах рассматриваемой технологии и тренды их применения.

Литература

1. Bhalla A. Are you SiC of Silicon? Part 2. www.powersystemsdesign.com/articles/are-you-sic-of-silicon-part-2/22/14407
2. Бхалла А. (Anup Bhalla). Вы за SiC или кремний? Тенденции развития и проблемы применения SiC в приложениях. Часть 1 // Силовая электроника. 2020. № 1.
3. Михайлов А. И. Физико-технологические основы формирования канала силового МДП-транзистора на карбиде кремния. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб, 2018. www.etu.ru/assets/files/nauka/dissertacii/2018/mihajlov/dissertaciya-mihajlova-a.-i.pdf
4. Zhu M. Switching Fast SiC FETs with a Snubber. Application Note: UnitedSiC_AN0018 November 2018. www.unitedsic.com/wp-content/uploads/2019/11/Snubber-AppNotes_V8.pdf
5. Dr. Bhalla A. Follow the Yellow SiC Road. www.powersystemsdesign.com/articles/follow-the-yellow-sic-road/35/15987
6. Бекедаль П. (Peter Bechedahl), Бетов С. (Sven Bütow), Мол А. (Andreas Maul), Роеблиц М. (Martin Roebnitz), Спенг М. (Matthias Spang). Концепция мощного SiC-модуля со сверхнизкой коммутационной индуктивностью // Силовая электроника. 2018. № 2.
7. SA110 Fully Integrated Half-Bridge Module. Apex Microtechnology Inc. Jan 2020 Rev D. www.apexanalog.com/resources/products/sal10u.pdf