

# Вы за SiC или кремний?

## Тенденции развития и проблемы применения SiC в приложениях. Часть 1

**Эта публикация открывает цикл из шести статей, в которых будут рассмотрены преимущества и проблемы изготовления и применения полупроводниковых приборов на основе карбида кремния. Цель цикла — дать систематизированные общие сведения по этой относительно новой, но уже вполне заслуженно завоевывающей популярность технологии и области ее применения<sup>1</sup>.**

**Ануп Бхалла (Anup Bhalla)**

**Перевод:  
Владимир Рентюк**

Применение полупроводниковых приборов на основе карбида кремния (SiC) началось в 2000-х годах, с принятием SiC-диодов Шоттки (Junction Barrier Schottky, JBS-диодов) в приложениях коррекции коэффициента мощности (ККМ). За этим последовало использование SiC-диодов и полевых транзисторов в индустрии инверторов для солнечной энергетики. Сейчас рост выпуска приборов на основе SiC стимулирует недавний всплеск приложений, связанных с бортовыми зарядными устройствами электрических транспортных средств и преобразователями напряжения постоянного тока. Быстрое развитие этой полупроводниковой технологии обусловлено внедрением в электромобилях инверторов с шиной напряжения постоянного тока на 650 В, потребностью в новых более эффективных источниках питания для мощных серверов и перспективами развития систем сотовой связи пятого поколения (5G). В статье рассматриваются преимущества устройств на базе SiC по сравнению с приборами на основе кремниевых технологий.

### Преимущества устройств на основе SiC

Преимущества использования полевых SiC-транзисторов над IGBT (IGBT — Insulated Gate Bipolar Transistor, биполярный транзистор с изолированным затвором, комбинированный прибор из биполярного и полевого транзисторов) были уже не раз наглядно продемонстрированы. Более широкая запрещенная зона 4H-SiC позволяет формировать блокирующие напряжение слои идеально и со в 100 раз меньшим сопротивлением открытого канала, чем у соответствующих им униполярных кремниевых полевых транзисторов. SiC также имеет в три раза лучшую по отношению к кремнию теплопроводность, соответственно, более быстро отводит тепло от полупроводникового перехода. На протяжении последних лет SiC МОП-транзисторы постоянно улучшали свои характеристики или, как сейчас принято говорить — производительность, и в на-

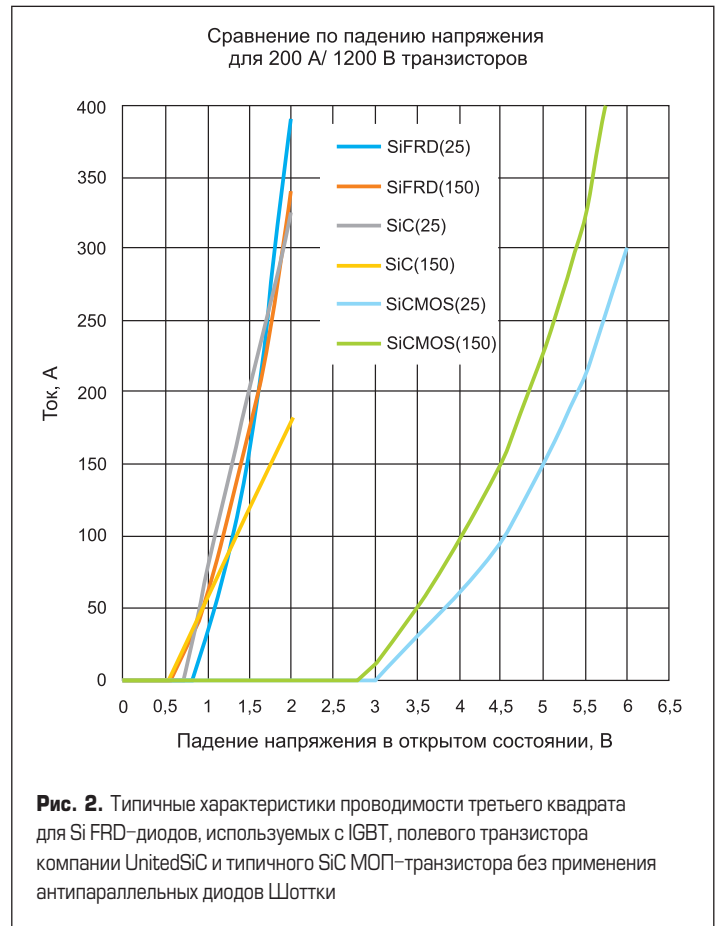
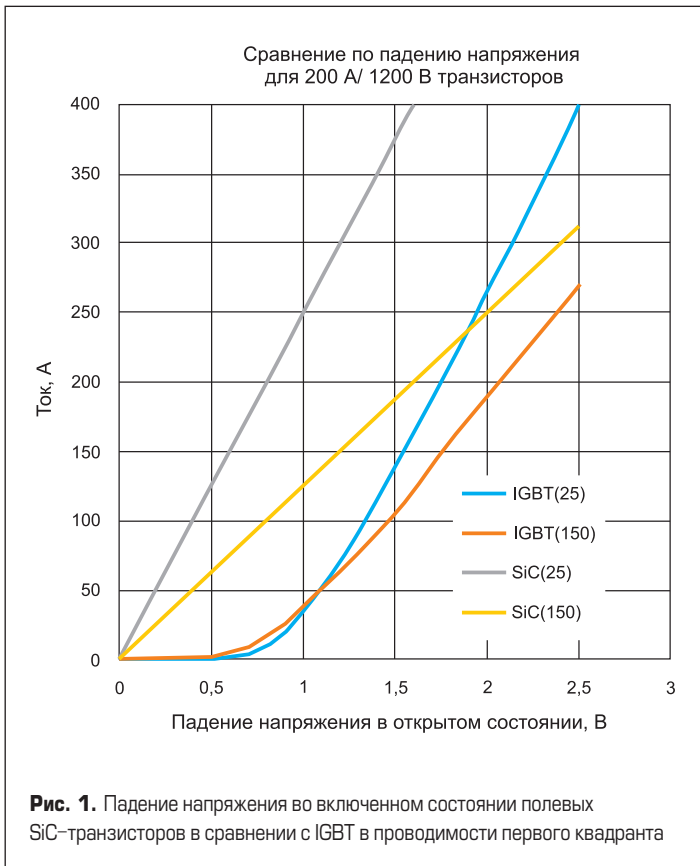
стоящее время доступны с рабочим (блокирующим) напряжением 650–1700 В как в виде планарных, так и в траншейных (пазовых Trench) структурах. К недостаткам этой технологии можно отнести то, что выполненные по ней транзисторы все еще страдают от плохой мобильности (подвижности) носителей МОП-канала.

Однако на основе SiC уже доступны планарные полевые транзисторы с управляющим *p-n*-переходом (Junction Field Effect Transistor, JFET) с меньшим размером кристалла, что как раз и обусловлено большей объемной подвижностью канала. Далее мы, если не понадобится характеризовать различия, будем называть все эти SiC-транзисторы полевыми, поскольку в большинстве случаев они могут использоваться взаимозаменяемо.

При напряжении 1200 В и выше кремниевые МОП-транзисторы (MOSFET — Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, полевой транзистор со структурой металл-оксид-полупроводник) уступают место IGBT, которые обеспечивают более низкие потери проводимости при высоких токах нагрузки. Но поскольку более низкие потери в IGBT возникают в результате модуляции проводимости, это сопровождается ростом потерь на переключение, называемых еще «коммутационные потери».

Обычно IGBT используются с антипараллельными быстродействующими *p-i-n*-диодами, которые хоть и отличаются быстрым восстановлением заряда, но также вносят вклад в потери при переключении, поскольку накопленный в этих диодах заряд должен быть удален, прежде чем диоды смогут выдержать напряжение в выключенном состоянии. На рис. 1 даны характеристики полевого транзистора компании UnitedSiC во включенном состоянии в сравнении с типичными для IGBT, рассчитанными на рабочий ток 200 А и напряжение 1200 В. Как видно из приведенных графиков, для всех условий эксплуатации с токами 200 А при использовании технологии SiC наблюдаются более низкие потери проводимости, особенно с учетом линейности и отсутствия области перегиба характеристики.

<sup>1</sup>Первые цикл опубликован в Power Systems Design и доступен по ссылке [1].



**Рис. 1.** Падение напряжения во включенном состоянии полевых SiC-транзисторов в сравнении с IGBT в проводимости первого квадранта

**Рис. 2.** Типичные характеристики проводимости третьего квадрата для Si FRD-диодов, используемых с IGBT, полевого транзистора компании UnitedSiC и типичного SiC МОП-транзистора без применения антипараллельных диодов Шоттки

На рис. 2 в режиме свободного хода сравниваются характеристики третьего квадранта IGBT с Si FRD (FRD — Fast Recovery Diode, быстро останавливающиеся диоды, в данном случае кремниевые), полевого транзистора компании UnitedSiC и SiC МОП-транзистор. В отсутствие антипараллельного диода или встроенного диода Шоттки у приборов SiC-технологии потери проводимости для SiC МОП-транзисторов намного выше, чем при обычно используемых IGBT с FRD-диодом. Однако и SiC МОП-транзисторы, и каскодные полевые транзисторы (Cascode FET), о которых более подробно речь пойдет во второй части цикла, отличаются низким зарядом обратного восстановления внутреннего диода  $Q_{RR}$  (часто в 10 раз ниже, чем у кремниевого FRD-диода). Поэтому полевые SiC-транзисторы могут переключаться намного быстрее, нежели их IGBT-аналоги. Но тут есть важный момент: обязательным условием для SiC МОП-транзисторов является синхронное переключение. Это необходимо для того, чтобы избежать чрезмерных потерь на проводимость в третьем квадранте.

**SiC-диоды в корректорах коэффициента мощности и повышающих преобразователях**

В настоящее время в цепях корректоров коэффициента мощности (ККМ) и повышающих преобразователей широко распространены SiC-диоды, поскольку отсутствие накопленного заряда в полевых транзисторах приводит к значительному уменьшению потерь на включение  $E_{ON}$ , в отличие от МОП-транзисторов с так называемым суперпереходом (Super-Junction MOSFET) на рабочее напряжение 650 В или при напряжении шины напряжения постоянного тока 400 В, или при быстром IGBT для шины 600–1500 В. Однако на самом деле основное преимущество использования SiC-диода Шоттки (Junction Barrier Schottky, JBS) заключается с ростом напряжения. Даже без применения полевых SiC-транзисторов в качестве основного коммутационного устройства, такие диоды предлагают путь к повышению эффективности и более высокой рабочей частоте, что объясняет рынок в более чем \$100 млн для этих хорошо проработанных с точки зрения технологии продуктов<sup>2</sup>.

**Преимущества использования SiC-транзисторов в цепях с жестким переключением**

В таблице представлены основные параметры из ряда спецификаций (datasheet), представляющие интерес при оценке технологий коммутации для приложений с жестким переключением ключа (то есть не через нуль тока или напряжения).

Давайте рассмотрим несколько важных моментов. Для источников питания сервера могут использоваться телекоммуникационные выпрямители и встроенные зарядные устройства, которые работают с напряжением шины 400 В, с использованием двухтактного ККМ и трехфазного активного выпрямителя с внешним интерфейсом в зависимости от уровня мощности. Для повышения плотности мощности и снижения затрат на спецификацию здесь необходимы более высокие частоты переключения, чтобы как минимум уменьшить размеры дросселей и катушек индуктивности.

<sup>2</sup>Подробно об использовании SiC-диодов в данном направлении техники в [2].

**Таблица.** Ключевые параметры, полезные при оценке транзисторов для режима жесткого переключения

Параметр транзистора	Описание параметра	Полевые МОП-транзисторы с суперпереходом	Полевые SiC-транзисторы
RdsA	Сопротивление открытого канала на единицу площади кристалла	8	0,75
RdsA +175 °C	Сопротивление открытого канала на единицу площади кристалла при температуре +175 °C	24	1,5
Rds * Eoss	Сопротивление открытого канала к потерям на отключение	480	255
Rds * Qg	Сопротивление открытого канала к заряду затвора	4x	1x
Rds * QRR	Сопротивление открытого канала к заряду обратного восстановления	100x	1x
Unclamped Inductive Switching (UIS)	Возможность выключения при индуктивной нагрузке	Да	Да

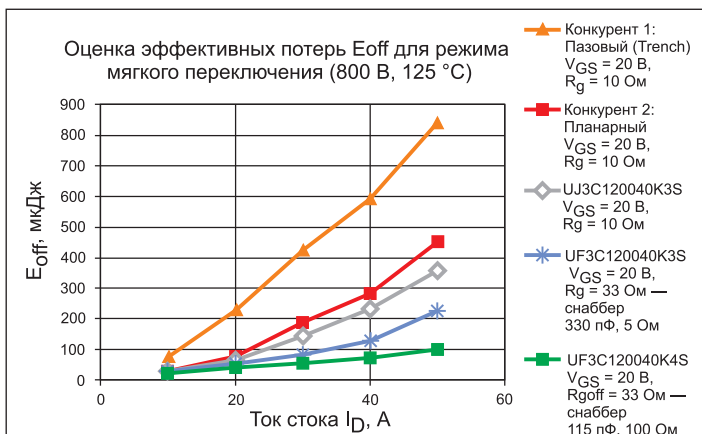
Высокие потери на включение  $E_{ON}$  не позволяют применять кремниевые полевые транзисторы в режиме непрерывной проводимости (continuous conduction mode, CCM), и не только по причине чрезмерно высоких потерь, но и из-за плохих характеристик восстановления. Причем это касается даже тех устройств, в которых для уменьшения заряда восстановления диода  $Q_{RR}$  сокращен срок службы транзистора. В отличие от кремниевых полупроводниковых приборов все решения полевых SiC-транзисторов имеют отличные диоды с низким  $Q_{RR}$  и, следовательно, у них значительно снижены потери на проводимость  $E_{ON}$ . При использовании таких транзисторов в корпусах с выводом для подключения по схеме Кельвина, таких как, например, TO247-4L, D2PAK-7L и DFN8x8, разработчики могут использовать частоты для жесткого переключения в 2–3 раза выше, чем это допустимо для их кремниевых собратьев. Также здесь помогает и то, что все опции полевых SiC-транзисторов имеют более низкое значение  $T_{CR}$ , то есть меньшее увеличение сопротивления в открытом состоянии при повышении температуры кристалла.

### Преимущества использования SiC-транзисторов в цепях с мягким переключением

Применение для преобразования напряжения постоянного тока мостового преобразователя с фазовым сдвигом (Phase Shift Full Bridge, PSFB) и резонансного LLC (индуктивность-индуктивность-емкость) преобразователя широко распространено в блоках питания для серверов, телекоммуникационных источниках питания, а также в бортовых зарядных устройствах электромобилей и установленных в них DC/DC-преобразователях.

Использование в таких приложениях в качестве коммутаторов (ключей) транзисторов на полупроводниках с широкой запрещенной зоной, в том числе и полевых транзисторов на основе SiC, обусловлено, в частности, присущими им следующими характеристиками:

1. Полевые SiC-транзисторы имеют низкую выходную емкость  $C_{oss}$  (она измеряется между стоком и истоком, когда затвор замкнут по переменному току на сток), что обеспечивает быстрое затухание переходных процессов напряжения сток-исток ( $V_{DS}$ ) при включении, это в свою очередь позволяет использовать высокую частоту переключения или широкий диапазон перехода от входного к выходному напряжению.
2. Потери при выключении с плавным переключением при включении можно оценить как измеренную энергию с жестким переключением минус энергия, накопленная в выходной емкости, выраженная как  $E_{OFF} - E_{OSS}$  и как показано на рис. 3. Можно видеть, что для полевых SiC-транзисторов, таких как UF3C120040K4S, энергия отключения чрезвычайно мала.



**Рис. 3.** Эффективные потери при отключении ( $E_{OFF} - E_{OSS}$ ) для различных вариантов полевых SiC-транзисторов. Потеря в 100 мкДж при 50 А, 800 В означает, что устройство генерирует лишь 10 Вт потерь на отключение на частоте переключения 100 кГц при использовании в PSFB при этом токе. При более низких токах низкие потери допускают частоты преобразования до 500 кГц

3. Низкие значения сопротивления канала в открытом состоянии  $R_{DS(ON)}$  в сочетании с высокими значениями номинального напряжения позволяют преобразователям постоянного тока работать при напряжении шины напряжения постоянного тока с напряжением 800 В.
4. Полевые SiC-транзисторы, как уже было сказано ранее, отличаются низким зарядом обратного восстановления и имеют очень высокую скорость нарастания напряжения, лежащую в диапазоне 100–200 В/нс. Это практически исключает отказы, вызванные проблемой скорости нарастания напряжения  $dv/dt$ , и позволяет избежать сокращения срока службы ключей.
5. Наконец, полевые SiC-транзисторы и транзисторы компании UnitedSiC, в частности, имеют еще и низкое падение напряжения на диоде, обычно всего 1,5 В, по сравнению с 3–5 В для SiC МОП-транзисторов и нитрид-галлиевых транзисторов с высокой подвижностью электронов (GaN HEMT). При увеличении частоты процент времени, в течение которого встроенный в транзистор диод проводит через себя ток, увеличивает потери проводимости в период «мертвого» времени.

### Преимущества использования SiC-транзисторов для тяговых инверторов электрических транспортных средств

Преимущества в части малых потерь полевых SiC-транзисторов могут при жестком переключении принести пользу тяговым инверторам электрических транспортных средств, но только если рабочие частоты для привода двигателя низкие, главное преимущество здесь должно заключаться в более низких потерях проводимости. На рис. 1 и 2 показано, что у полевых SiC-транзисторов это обусловлено более низким сопротивлением на единицу площади кристалла и, в отличие от IGBT, отсутствием перегиба напряжения в зависимости прямой проводимости от тока и возможностью синхронной обратной проводимости.

Главная характеристика ключевого силового транзистора для электромобилей — его устойчивость к короткому замыканию различных типов. Это требует, чтобы такой коммутатор выдерживал полное напряжение шины напряжения постоянного тока (400 В для устройств с рабочим напряжением 650 и 800 В для устройств, рассчитанных на 1200 В), одновременно проводя большой ток при полностью включенном затворе в течение 2–6 мкс и до тех пор, пока схема защиты периода времени гашения, занимающего 0,5–2 мкс. Затем драйвер пытается мягко выключить ключ. В течение этого времени транзистор может за несколько микросекунд испытывать повышение температуры на 300–500 °С и, тем не менее, должен безопасно отключаться. Кроме того, коммутатор должен устойчиво переносить до 100 или 1000 таких критических ситуаций без изменения (имеется в виду деградация) своих параметров.

В то время как эти требования предъявляются в основном к IGBT, SiC МОП- и GaN HEMT-транзисторы также хотят занять свое место под солнцем и борются за достижение одинакового или превышающего IGBT уровня надежности. Каскадные полевые транзисторы компании UnitedSiC уникальны своей способностью безопасно обрабатывать повторяющиеся короткие замыкания с минимальным компромиссом в размере кристалла или сопротивления открытого канала. Это вытекает из внутренних характеристик нормально включенного полевого транзистора, выполненного по технологии JFET, который, будучи устройством с объемной проводимостью, не имеет изолирующего оксида затвора, склонного к деградации, и, соответственно, может выдерживать более высокие температуры и пики электрического поля, чем SiC МОП-транзистор. Кроме того, присущее полевым транзисторам JFET уменьшение проводимости канала из-за самонагрева быстро снижает ток, протекающий через устройство, замедляя скорость нагрева, и позволяет устройству проработать дольше, прежде чем оно выйдет из строя. Здесь зависимость сопротивления канала от температуры играет положительную роль.

SiC-транзисторы, как правило, более устойчивы в этом режиме, поскольку данные вертикальные решения поглощают тепло в своем объеме, тогда как GaN HEMT являются боковыми устройствами, которые выделяют тепло в ультратонком двумерном электронном газе.

### Преимущества использования SiC-транзисторов в линейном режиме

На рис. 4 показаны нормализованные значения напряжения включения  $V_{TH}$  в зависимости от температуры в условиях нормальной проводимости планарного полевого SiC-транзистора в сравнении с SiC МОП-транзистором и кремниевым МОП-транзистором.

На графиках рис. 4 четко видно, что только нормально включенный полевой SiC-транзистор технологии JFET предотвращает снижение  $V_{TH}$  с температурой. Если устройством используется в качестве источника тока или даже в твердотельном реле, где оно намеренно переключается медленно, время, проведенное в режиме слабого тока, при низком значении напряжения  $|V_{GS}-V_{TH}|$  и высоком  $V_{DS}$ , может привести к тому, что устройства с отрицательными температурными коэффициентами  $V_{TH}$  будут подвержены шнурованию тока и выходу из строя при гораздо более низких напряжениях, чем это ожидалось. Сказанное не относится к полевым SiC-транзисторам технологии JFET, и этот факт был экспериментально подтвержден. Вот почему полевые SiC-транзисторы технологии JFET становятся очень полезными для формирования источников тока, электронных нагрузок и т. д., где они должны быть смещены в режиме малого тока при высоком напряжении без разрушения транзистора вплоть до его номинального напряжения пробоя.

### Преимущества использования SiC-транзисторов в схемах защиты и ограничения тока

Тот факт, что  $V_{TH}$  не уменьшается с температурой, а также превосходное ограничение тока, устойчивость полевых SiC-транзисторов технологии JFET к короткому замыканию и их способность до момента разрушения выдерживать в четыре раза более высокое рассеяние мощности, чем кремниевые устройства, делает SiC-транзисторы весьма полезными не только в автоматических выключателях, но и в качестве ограничителей пускового тока и переключателей нагрузки (в том числе и под нагрузкой). Полевые SiC-транзисторы технологии JFET имеют минимальное из доступных  $R_{DS(ON)}$  при заданном размере кристалла и меньшие потери на проводимость при эксплуатации, не ставя под

угрозу надежность этих устройств и конечного продукта при повторяющейся перегрузке по току.

### Новый подход к гибким полевым планарным транзисторам высокого напряжения

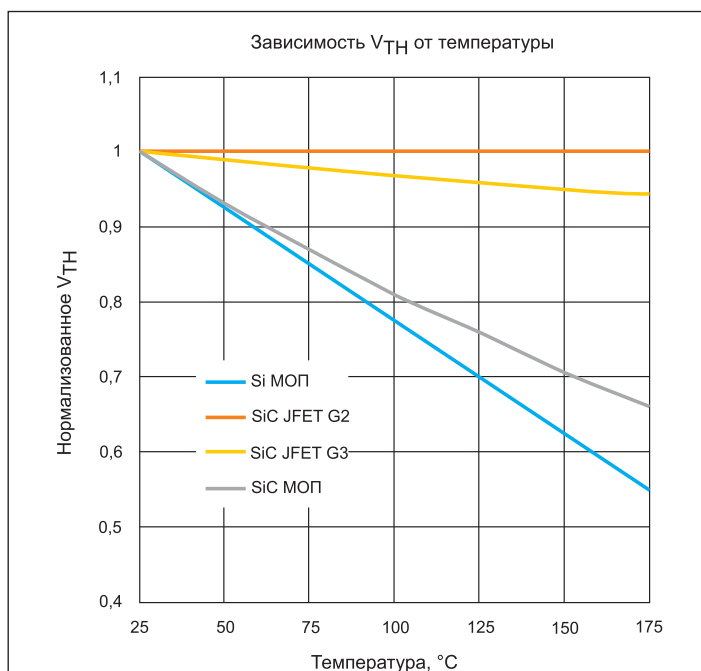
Компания UnitedSiC продемонстрировала новый подход с использованием суперкаскадных полевых SiC-транзисторов технологии JFET для приложений, требующих высокого напряжения. Для достижения очень высокого рабочего напряжения были построены ключи с последовательным соединением нескольких обычных полевых SiC-транзисторов с одним низковольтным кремниевым МОП-транзистором и уникальной схемой смещения. В результате получено комбинированное устройство, которое можно использовать в качестве трехконтактного ключа. В последних разработках, предназначенных для полумостового модуля на ток 200 А с рабочим напряжением 6500 В, предусмотрена конструкция с пятью последовательными полевыми SiC-транзисторами технологии JFET с рабочим напряжением 1700 В. Устройство переключается с одним драйвером затвора напряжением 0–12 В и отличается малым зарядом затвора  $Q_g$ . При этом нет необходимости в отдельных драйверах затвора, как при последовательно подключенных IGBT или SiC МОП-транзисторах. Еще одна иллюстрация применения такого слаботочного переключателя — создание методом суперкаскадного включения одиночного переключателя на напряжение 40 кВ. Поскольку технология полевых SiC-транзисторов JFET с более низким напряжением является уже достаточно зрелой, а исходный материал менее дорогостоящим, разработчики имеют возможность выбирать более дешевые решения, вплоть до ранее недостижимого уровня рабочего напряжения. В качестве альтернативы, если конкретный класс напряжения или тока необходим и недоступен, его легко сконструировать с помощью устройств технологии JFET UnitedSiC по ее каскадному принципу.

### Заключение

В статье мы постарались охватить целый ряд важных вопросов, кратко объяснив преимущества, которые можно увидеть благодаря решениям на основе полевых и планарных полевых транзисторов технологии SiC для широкого спектра применений. Более подробную информацию по этим вопросам можно найти на веб-сайте компании UnitedSiC и в публикациях. Полевые транзисторы SiC не только улучшают конструкцию 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 благодаря широкому диапазону драйверов затвора. В первой публикации цикла были объяснены преимущества полевых транзисторов компании UnitedSiC в инверторах электрических транспортных средств, которые являются следствием низких потерь на проводимость и надежной работы в условиях короткого замыкания. Уникальной нишей для технологии полевых SiC-транзисторов технологии JFET являются приложения с активным режимом и защиты цепей, особенно для высокого напряжения и мощности. Кроме того, планарные полевые транзисторы также подходят для создания гибких высоковольтных переключателей высокого напряжения с использованием низковольтных строительных блоков из менее высоковольтных транзисторов. Следующие статьи цикла предоставят больше информации о полупроводниковых приборах рассматриваемой технологии и области их применения.

### Литература

1. [www.powersystemsdesign.com/articles/are-you-sic-of-silicon-part-1/22/14274](http://www.powersystemsdesign.com/articles/are-you-sic-of-silicon-part-1/22/14274)
2. Рентюк В., Смирнова В., авторский перевод. Выбор SiC-диодов Шоттки для активных корректоров коэффициента мощности, работающих в режиме непрерывных токов // Силовая электроника. 2017. № 5.



**Рис. 4.** Изменения нормализованного значения  $V_{TH}$  в зависимости от температуры для кремниевых МОП-транзисторов, планарных полевых SiC-транзисторов и SiC МОП-транзисторов. Отрицательный наклон приводит к нестабильной работе при низких значениях  $|V_{GS}-V_{TH}|$  на высоком  $V_{DS}$ . Эта проблема, как правило, отсутствует у планарных полевых транзисторов технологии SiC