

Модули SiC LinPak второго поколения:

улучшенные динамические характеристики и надежность

Каждый день, просыпаясь и включая свет, кофеварку или электрическую плиту, чтобы приготовить завтрак, мы ожидаем, что все наши электродвигатели, нагреватели и осветительные приборы будут работать идеально. По всему миру уже используются миллиарды таких устройств, которые должны работать по щелчку выключателя, и каждый день появляется еще больше приборов, требующих 100% надежного питания. Их настолько много, что за последние два десятилетия спрос на электроэнергию удвоился, а в ближайшие 20 лет он, скорее всего станет еще в два раза больше.

Вергилий Ботан
(Virgiliu Botan)

Славо Кичин
(Slavo Kicin)

Перевод:
Иван Сергеев

Введение

С одной стороны, производство электроэнергии необходимо увеличивать для обеспечения растущего спроса. Желательно, чтобы это происходило за счет источников, которые не наносят вреда окружающей среде, таких как ветряная и солнечная энергетика, гидроэнергетика и подобные технологии производства возобновляемой энергии. С другой стороны, ее поставка потребителям должна осуществляться надежно и без потерь. В цепочке, состоящей из производства энергии и ее преобразования в электричество, а затем в тепло, свет или механическое движение, ключевую роль в повышении эффективности играют силовые полупроводниковые приборы.

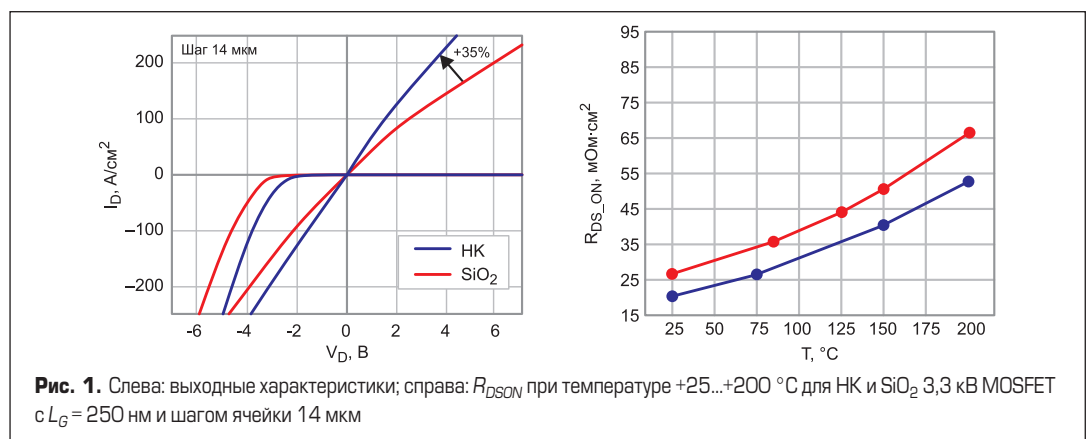
Для того чтобы повысить КПД и снизить общее воздействие энергетических систем на окружающую среду, от силовых модулей требуется максимальная мощность при минимальных потерях. Для решения этой задачи полупроводниковые чипы должны устанавливаться в корпуса, обеспечивающие высокую плотность тока за счет снижения теплового сопро-

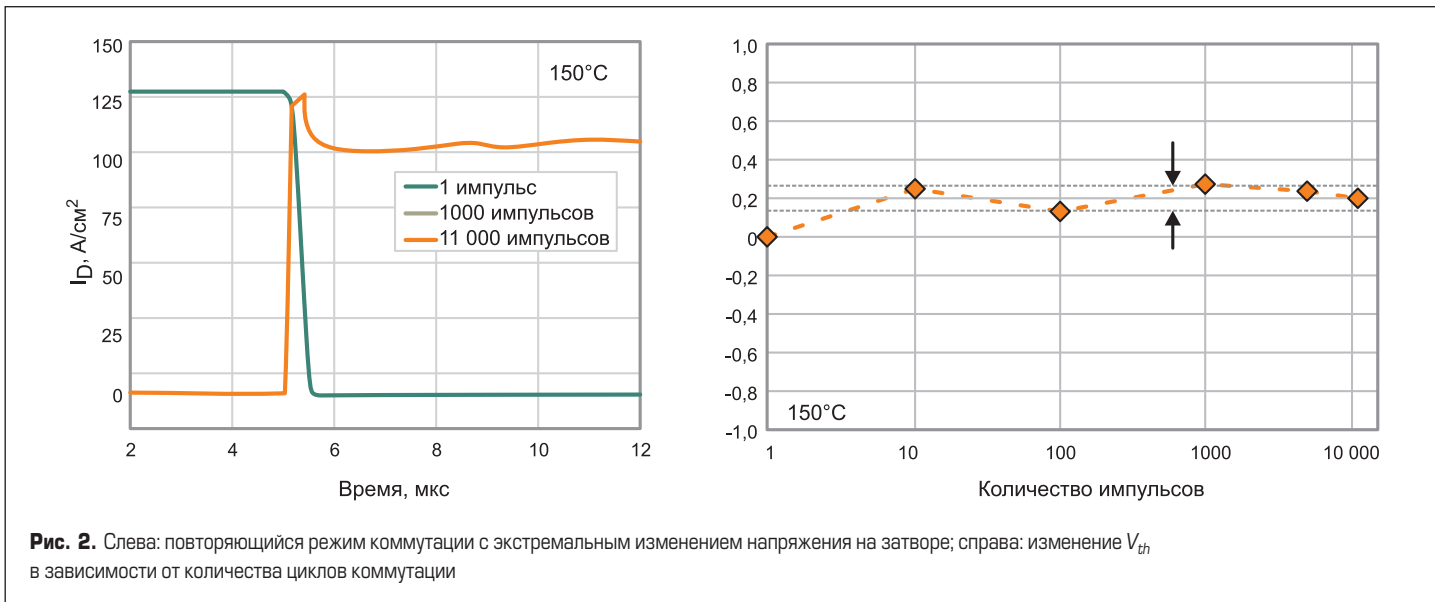
тивления при одновременном увеличении ожидаемого срока службы.

Конструктив LinPak зарекомендовал себя как промышленный стандарт в различных областях применения, включая тяговые приводы, преобразователи ветроэнергетических станций, системы хранения энергии, фотоэлектрические конвертеры, моторные приводы, твердотельные трансформаторы и т. д. Повышение эффективности этого модуля достигается благодаря использованию новых полупроводниковых материалов, таких как SiC. Карбид кремния обладает рядом неоспоримо лучших характеристик по сравнению с кремнием (Si), в частности более высокой напряженностью электрического поля и теплопроводностью. В статье рассматривается процесс проектирования прибора и способы его оптимизации для повышения производительности в конкретных приложениях.

SiC с диэлектриком High-K

Уникальные свойства карбида кремния делают модули SiC MOSFET более компактными, при этом





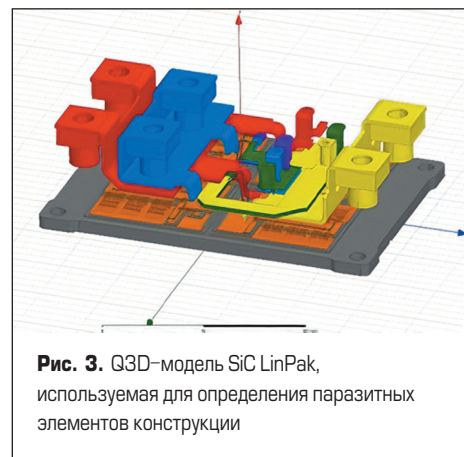
потери переключения у них составляют лишь небольшую долю от общего значения, и они гораздо меньше, чем у аналогичных Si IGBT [7]. Однако карбидкремниевые ключи имеют ряд проблем, главные из которых — стоимость и надежность. Например, диэлектрик затвора, особенно на границе раздела с полупроводником, очень подвержен деградации. В некоторых публикациях [1–6] показано, что перспективным представляется использование диэлектрика с высокой диэлектрической постоянной, которая в англоязычной литературе обозначается символом κ (каппа), или просто k . В полупроводниковой технологии такой диэлектрик, называемый High-K, или НК, — это материал, диэлектрическая постоянная которого выше, чем у обычного диоксида кремния ($\epsilon = 3,9$) или оксинитрида кремния ($\epsilon < 6$).

С одной стороны, из-за более высокой диэлектрической проницаемости и, следовательно, более высокой диэлектрической емкости ($C_D = \epsilon_D/t_D$) структуры НК MOSFET имеют меньшее сопротивление канала R_{DSon} по сравнению с ключами с затворным диэлек-

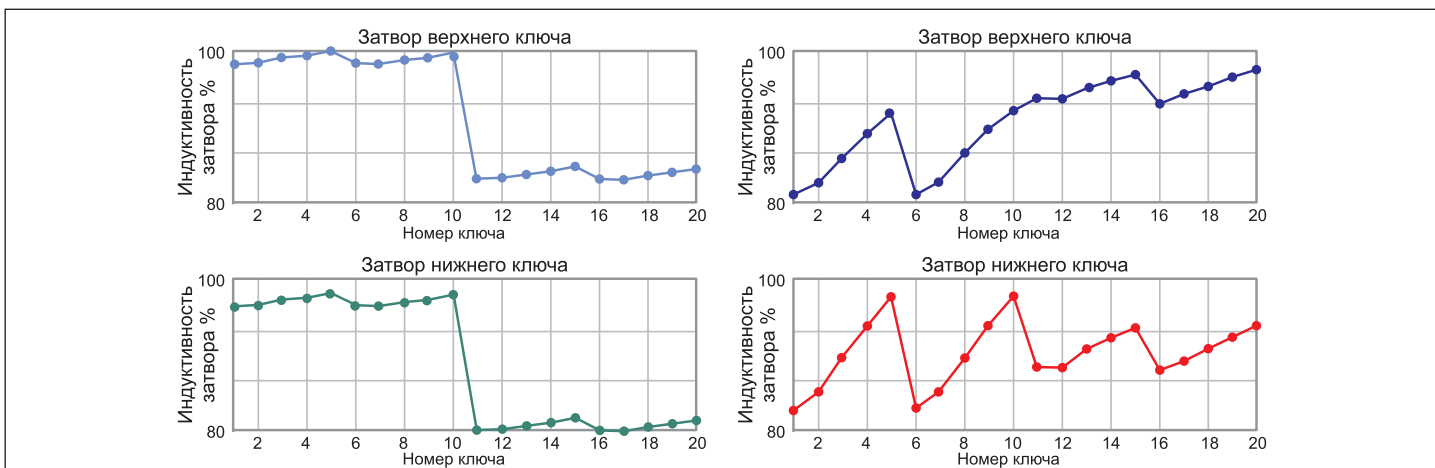
триком SiO_2 (рис. 1). С другой стороны, что еще более важно, это уменьшает плотность так называемых интерфейсных ловушек (D_{it}), в результате чего существенно повышается стабильность порогового напряжения V_{th} даже после десятков тысяч циклов коммутации V_{GS} от +15 до -15 В (рис. 2). Это гарантирует постоянность динамических характеристик даже в тех случаях, когда полупроводник во время работы подвергается опасным всплескам напряжения на затворе. Дальнейшая оптимизация свойств прибора достигается за счет увеличения ширины канала и уменьшения шага ячеек, что снижает сопротивление канала R_{DSon} а также потери переключения.

Оптимизация дизайна модуля

Большая плотность дефектов SiC-структур — одна из основных причин высокой стоимости карбидкремниевых транзисторов. Этот фактор также ограничивает размеры SiC-чипов, которые обычно не превышают 5×5 мм, чтобы сохранить привле-



мую цену. Еще одна проблема заключается в том, что для получения сравнимого с Si IGBT номинального тока в модуле LinPak необходимо включать в параллель множество кристаллов SiC MOSFET (до 40 шт.). Параллельная работа нескольких сверхбыстрых SiC-MOSFET в свою очередь создает



сложности для проектирования с точки зрения электромагнитных характеристик. Чтобы гарантировать низкие потери переключения и надежную работу модуля, необходимо обеспечить быструю коммутацию без возникновения опасных осцилляций и сбалансирован-

ное распределение статических и динамических токов между параллельными чипами. В 2018 году компания Hitachi Energy Semiconductors (ранее — ABB) представила мощные карбидкремниевые модули с напряжением 1,7 и 3,3 кВ, разработанные на плат-

форме LV LinPak. В их конструкции использована инновационная многоуровневая концепция, обеспечивающая гибкую трассировку силовых и сигнальных цепей. Модули LinPak продемонстрировали быструю и надежную коммутацию до 40 SiC MOSFET-кристаллов,

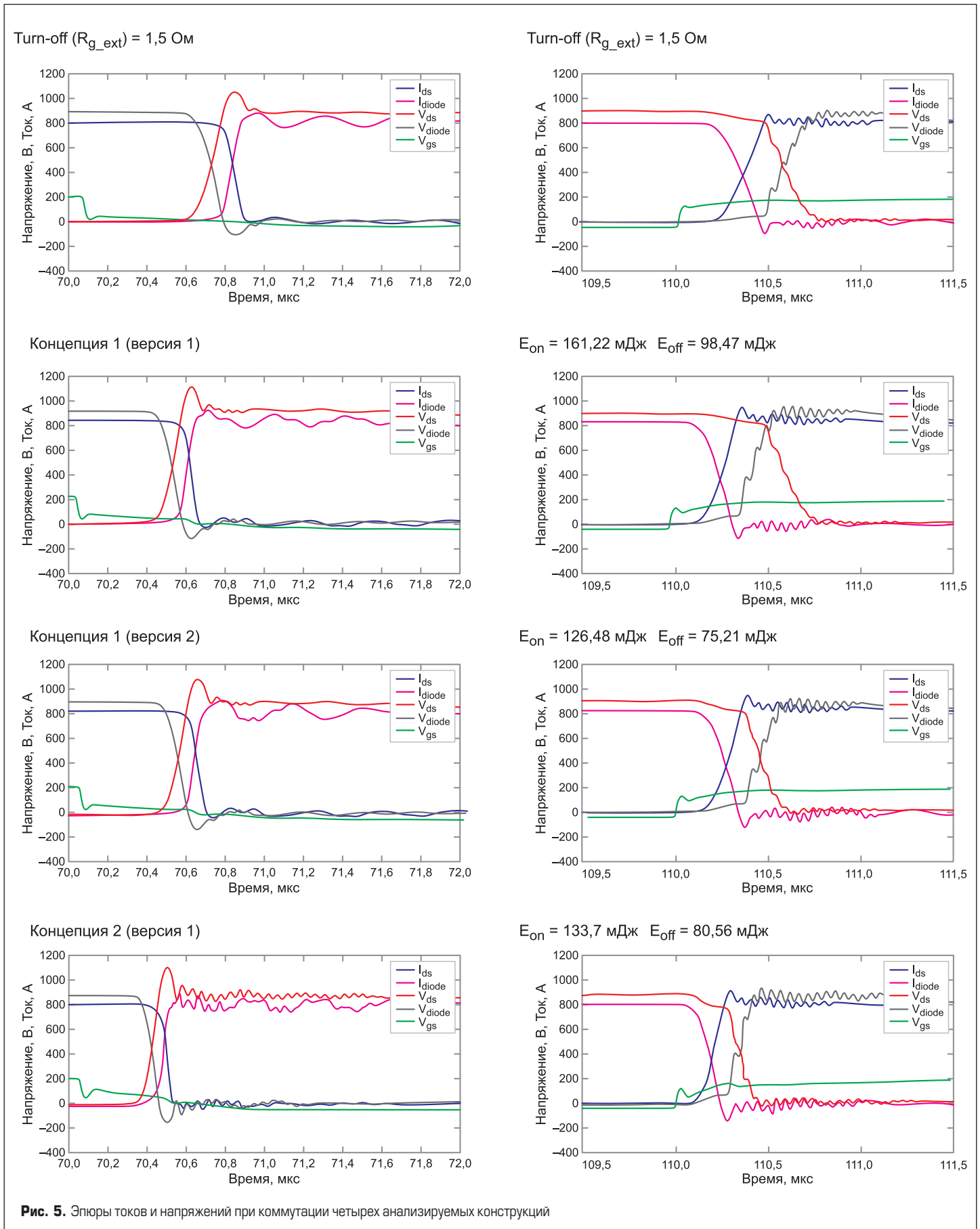


Рис. 5. Эпюры токов и напряжений при коммутации четырех анализируемых конструкций

включенных параллельно в рамках одного ключа. Испытания, проведенные с помощью оптимизированной тестовой установки, показали, что потери переключения LinPak близки к потерям дискретных устройств [7].

В течение нескольких лет Hitachi Energy Semiconductors собирала отзывы потребителей и использовала их для дальнейшего совершенствования конструкции модуля. В результате было разработано новое, второе поколение SiC LinPak, имеющее два основных отличия:

- повышенная производительность модуля, уменьшенные потери переключения;
- упрощенная конструкция по сравнению с дизайном первого поколения для улучшения технологичности производства.

Внутренние резисторы затвора R_{Gint} модулей SiC LinPak первого поколения (размещенные на DCB-подложке) использовались для предотвращения осцилляций в цепи затвора при любых условиях эксплуатации. Хотя эти резисторы повышают надежность коммутации, они в то же время ограничивают минимально достижимый уровень динамических потерь. Для улучшения этого показателя конструкция модуля была усовершенствована. Прежде всего, анализировались основные причины возникновения паразитных осцилляций, что дало возможность найти средства решения проблемы. Оптимизация позволила свести к минимуму необходимость использования R_{Gint} и снизить общую сложность конструкции. Процесс доработки, состоящий из нескольких циклов итерации, включал следующие шаги:

- Определение и минимизация распределенных индуктивностей L_s с помощью программы Ansys Q3D Extractor (рис. 3). Цель состояла в получении сбалансированных паразитных индуктивностей, индуктивностей затвора и отрицательных связей затворов параллельных MOSFET. Улучшение характеристик, достигнутое за счет оптимизации конструкции, показано на рис. 4.
- Полученные значения паразитных элементов использовались для оценки динамических характеристик модуля с использованием ПО SIMetrix. Чтобы обеспечить высокую скорость коммутации без возникновения критических осцилляций, а также добиться сбалансированного распределения статических и динамических токов между чипами в реальном модуле, было проведено моделирование двухимпульсного теста модуля SiC LinPak, содержащего 20 и 40 MOSFET-кристаллов на ключ. В процессе анализа контролировалось напряжение и ток стока, а также сигналы управления каждого чипа, входящего в верхнее и нижнее плечо полумоста.

Вновь разработанная SPICE-модель с несколькими регулируемыми параметрами позволила изучить влияние отклонений (допусков) параметров MOSFET на динамические характеристики модуля.

Для сборки и тестирования модуля SiC LinPak 1,7 кВ использовались четыре варианта разработанной и оптимизированной конструкции, продемонстрировавшие наилучший баланс паразитных индуктивностей (в силовых и сигнальных цепях), взаимных связей затворов, а также

коммутацию без возникновения критических осцилляций. В прототипах были установлены такие же кристаллы SiC MOSFET, что и в предыдущем поколении модулей. Анализ переходных процессов и измерение потерь переключения проводились с помощью двухимпульсного теста с использованием испытательного стенда, оптимизированного с учетом высокой скорости переключения SiC LinPak.

На рис. 5 показаны эпюры включения и выключения, полученные для четырех протестированных конструкций модулей с использованием внешнего резистора затвора 1,5 Ом. На рисунке также указаны потери переключения E_{on}/E_{off} .

На рис. 6 приведено сравнение динамических потерь, измеренных при +150 °C без внешнего сопротивления R_{Gext} . Во всех четырех случаях благодаря улучшенной конструкции требовалось меньшее количество внутренних (устанавливаемых на подложке) резисторов затвора R_{Gint} или они вообще отсутствовали, поэтому потери переключения ниже, чем у SiC LinPak первого поколения. В одном случае их величина даже сопоставима с показателем E_{sw} дискретного SiC MOSFET.

Моделирование выходных параметров

Для оценки новой конструкции SiC LinPak было проведено несколько циклов моделирования с учетом применения этого силово-

Таблица. Условия моделирования

Топология	Двухуровневый VSI
Частота выходного сигнала F_{out}	10 Гц
Частота коммутации F_{sw}	2 кГц
Способ управления	Введение третьей гармоники
Фазный ток	$I_{ph} f(F_{sw}) @ T_{vjmax}$ или 600 А
Кэффициент мощности PF	1,0
Напряжение DC-шины	1180 В
Линейное напряжение LL	690 В (rms)
Температура окружающей среды	+45 °C
R_{th} системы охлаждения	11 К/кВт

го ключа в ветроэнергетической установке. Два модуля (20 MOSFET-чипов на ключ 5SFG 0900X170100, 40 MOSFET-чипов на ключ 5SFG 1800X170100) сравнивались с существующим Si IGBT LinPak (5SNG 1000X170300). Условия моделирования показаны в таблице.

Значительное снижение потерь переключения модуля 900A SiC демонстрирует практически плоская кривая зависимости выходного тока от частоты (рис. 7). Также видно, что, когда большое количество чипов MOSFET включено в параллель (например, 40 шт./ключ), скорость коммутации должна быть снижена, что влияет на уровень динамических потерь. Даже в этом случае модуль SiC на 1800 А имеет меньшую зависимость выходного тока от частоты, то есть при заданной нагрузке, например 800 А, модуль LinPak с кристаллами SiC

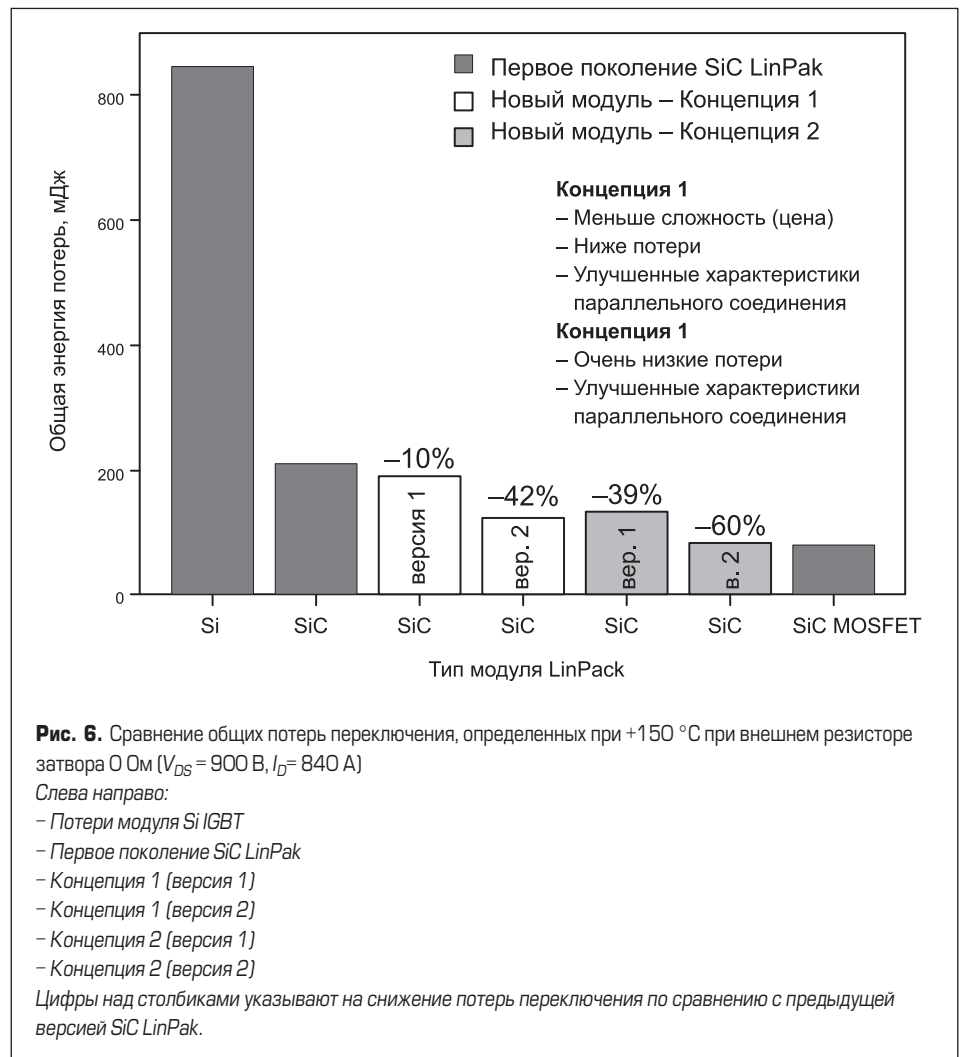


Рис. 6. Сравнение общих потерь переключения, определенных при +150 °C при внешнем резисторе затвора 0 Ом ($V_{DS} = 900$ В, $I_D = 840$ А)

Слева направо:

- Потери модуля Si IGBT
- Первое поколение SiC LinPak
- Концепция 1 (версия 1)
- Концепция 1 (версия 2)
- Концепция 2 (версия 1)
- Концепция 2 (версия 2)

Цифры над столбиками указывают на снижение потерь переключения по сравнению с предыдущей версией SiC LinPak.

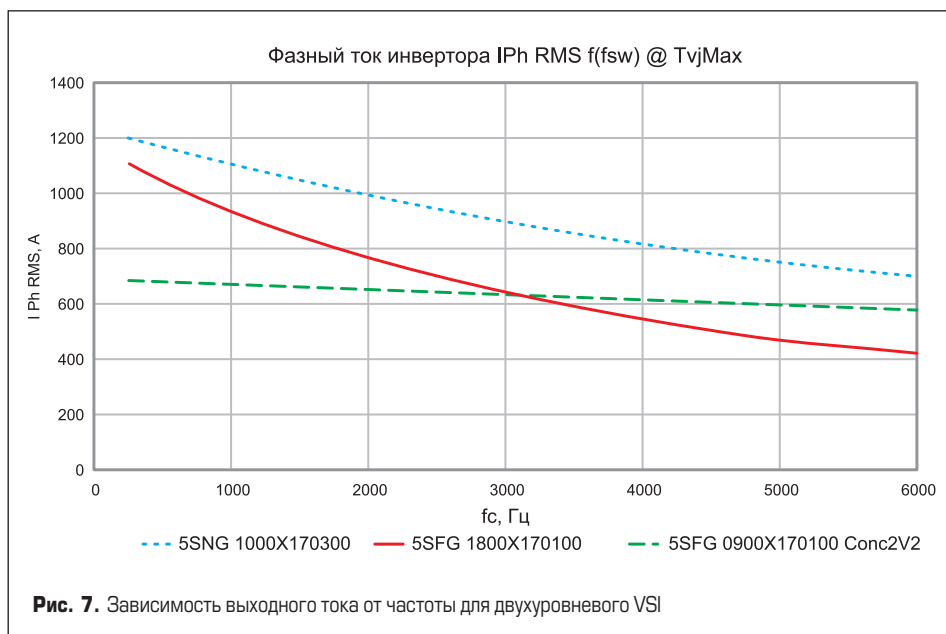


Рис. 7. Зависимость выходного тока от частоты для двухуровневого VSI

MOSFET может коммутироваться в два раза быстрее, чем аналогичный Si IGBT. Это является очевидным преимуществом с точки зрения требований к фильтрации выходного сигнала.

Одной из основных проблем ветроэнергетических систем является низкая частота основного сигнала (порядка 10 Гц), поскольку в зависимости от нагрузки это создает пульсацию температуры IGBT-чипов, достигающую 20–40 К. Расчеты для непрерывной работы с предельной нагрузкой показывают, что в течение срока службы преобразователя он может испытывать более 10 млрд таких циклов. При использовании тельного диода для работы в третьем квадранте SiC MOSFET имеет одинаковую активную площадь полупроводника для обоих направлений тока, что снижает пульсации температуры по сравнению с классическим случаем применения внешнего антипараллельного диода (FWD) IGBT. Это существенно влияет на ресурс силовых модулей.

Заключение

С 2018 года Hitachi Energy Semiconductors предлагает инженерные образцы модулей SiC LinPak. В последнее время была проделана большая работа по увеличению производительности и надежности SiC MOSFET, а также конструктива LinPak, который должен соответствовать новым, улучшенным чипам. Использование диэлектрика НК в затворе MOSFET улучшает ключевую характеристику R_{DSon} и значительно повышает надежность изоляции затвора в условиях больших перепадов напряжения.

Электромагнитное моделирование и проверка электрических характеристик позволили оптимизировать конструктив LinPak для достижения оптимального компромисса между динамическими потерями, технологичностью и надежностью. На последнем этапе разработки было проведено моделирование нового прибора в составе двухуровневого преобразователя ветроэнергетической установки и последующее сравнение результатов

со стандартным IGBT/FWD. Проведенные исследования подтвердили, что применение SiC LinPak способно повысить производительность и надежность широкого спектра современных приложений, таких как конвертеры для ветряных и солнечных энергетических систем, тяговые приводы, твердотельные трансформаторы и многое другое.

Литература

1. Wirths S. et al. Vertical 1.2kV SiC Power MOSFETs with High-k/ Metal Gate Stack. 31st International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). Shanghai, China, 2019.
2. Wirths S. et al. Vertical Power SiC MOSFETs with High-k Gate Dielectrics and Superior Threshold Voltage Stability. 32nd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). Vienna, Austria, 2020.
3. Wirths S. et al. Threshold Voltage Stability Study on Power SiC MOSFETs Using High-k Dielectrics. PCIM Europe digital days 2020. International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Germany, 2020.
4. Knoll L. et al. Robust 3.3kV silicon carbide MOSFETs with surge and short circuit capability. 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD). Sapporo, Japan, 2017.
5. Wirths S. et al. Study of 1.2kV High-k SiC Power MOSFETs Under Harsh Repetitive Switching Conditions. 33rd International Symposium on Power Semiconductor Device and ICs (ISPSD), 2021.
6. Romano G. et al. A Comprehensive Study of Short-Circuit Ruggedness of Silicon Carbide Power MOSFETs // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2016. Vol. 4. No. 3.
7. Kicin S. et al. Ultra-Fast Switching 3.3kV SiC High-Power Module. PCIM Europe digital days 2020. International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Germany, 2020.