

Roll2Rail: силовые модули нового поколения для тягового привода —

общие требования, рыночный анализ, технологическая дорожная карта и прогнозы.
Часть 2. Проблемы надежности силовых модулей

В настоящей статье, посвященной реализации проекта Roll2Rail, представлены результаты совместной деятельности крупнейших европейских поставщиков железнодорожного тягового оборудования по разработке и стандартизации нового, усовершенствованного модуля для тягового привода.

Сегодня практически все ведущие производители силовой элементной базы работают над решением этой задачи. В частности, в модуле SEMITRANS 20, спроектированном компанией SEMIKRON, внедрены все новейшие технологии силовой электроники. На базе SEMITRANS 20 для помощи разработчикам изготовлен прототип трехфазного инвертора (рис. 1).

Во второй части статьи о Roll2Rail рассмотрены проблемы надежности и стабильности параметров карбидокремниевых и кремниевых силовых ключей, а также вопросы их корпусирования, связанные с необходимостью повышения скорости коммутации и расширения температурного диапазона.

Под редакцией:
Т. Вийк (T. Wiik)

Перевод:
Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Надежность и долговременная стабильность

Решение вопросов надежности и долговременной стабильности параметров SiC будет в значительной

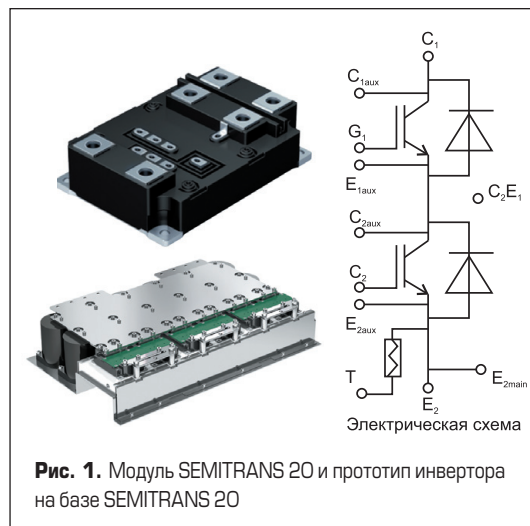


Рис. 1. Модуль SEMITRANS 20 и прототип инвертора на базе SEMITRANS 20

степени определять целесообразность их применения в тяговых инверторах. Технология карбида кремния является достаточно новой, и основное внимание в настоящее время уделяется улучшению основных электрических характеристик SiC-приборов. Изучение вопросов надежности требует работы с большим количеством приборов с сопоставимыми характеристиками и занимает длительное время. Доступно лишь небольшое число исследований, касающихся надежности и долговременной стабильности силовых SiC-модулей на коммерческом уровне. При рассмотрении вопросов надежности SiC-приборов можно выделить три основные области для дальнейших исследований и сравнения с силовыми модулями на основе Si.

Дрейф порогового напряжения

Известно, что пороговое напряжение SiC MOSFET смещается в зависимости от приложенного напряжения управления. Главным образом этот сдвиг объясняется плохим качеством оксидного слоя затвора, вследствие чего в нем имеется значительное количество незаряженных дефектных зон. При подаче сигнала управления носители инжектируются в оксид-

ный слой, дефектные зоны заряжаются, что приводит к сдвигу порогового напряжения. Результаты, полученные в последние годы, указывают на то, что вопрос о нестабильности напряжения может быть решен в ближайшем будущем и это не станет главной проблемой для дальнейшего развития SiC-технологии.

Надежность и долговременная стабильность оксидного слоя затвора

В отличие от дрейфа порогового напряжения проблема надежности и долговременной стабильности оксидного слоя затвора является гораздо более сложной, и в недавнем прошлом она рассматривалась как основная в отношении силовых SiC-модулей. В различных источниках указано, что существуют принципиальные различия между SiC и Si, обуславливающие гораздо худшую надежность и стабильность SiC MOSFET-структур. К настоящему времени доказано, что особенности изолированного затвора одинаковы для MOS-приборов на основе SiC и Si. Однако в отличие от кремниевых чипов оксид затвора SiC MOSFET подвержен воздействию значительно большего стресса. Главным образом это связано с более высоким критическим полем и большей шириной запрещенной зоны SiC. Электрическое поле на границе раздела между SiC и оксидом затвора может быть в 6–7 раз выше, чем у Si (до 2 МВ/см). В соответствии с законом Гаусса электрическое поле в оксидном слое затвора примерно в три раза превышает напряженность поля на поверхности, и оно легко может превзойти критическое значение 3 МВ/см.

Помимо высокой напряженности электрического поля, у силовых SiC MOSFET ниже барьер для инжекции электронов и дырок в оксидный слой затвора из-за более широкой запрещенной зоны. Вследствие обоих факторов туннельный ток, ответственный за деградацию затвора, у SiC также гораздо выше, чем у Si. Данные факторы, ускоряющие процесс деградации затвора, должны учитываться при создании SiC MOSFET-транзисторов и разработке драйверов затвора. Для SiC MOSFET с планарной структурой затвора это означает, что расстояние между заглубленными *p*-канавками не должно превышать 1 мкм, чтобы экранировать поверхность от электрического поля. Однако такая мера ограничивает минимально достижимое сопротивление канала. Кроме того, электрическое поле в полупроводнике и, следовательно, на границе раздела между SiC и оксидом затвора может значительно усиливаться за счет геометрических эффектов, приводящих к локальному превышению допустимой напряженности поля. В этих условиях использование SiC MOSFET с Trench-структурой затвора и толстым экранирующим нижним оксидным слоем представляется возможным решением проблемы.

По сравнению с планарным SiC MOSFET в транзисторе с Trench-структурой затвора и экранирующим нижним оксидным слоем высокое электрическое поле не проникает через оксид затвора. Таким образом, при высоком качестве экранирующего слоя эффект

деградации оксидного слоя затвора может быть ослаблен. Первые результаты тестов на надежность SiC MOSFET с Trench-затвором и толстым оксидным слоем, представленные Infineon, подтверждают эти предположения. Однако объем исследований, посвященных проблемам надежности SiC MOSFET с Trench-затвором, пока очень мал, и эту работу необходимо продолжить.

Независимо от структуры затвора физические свойства SiC должны быть учтены при проектировании драйвера затвора. Из-за меньшего барьера для электронов и дырок при одинаковом напряжении на затворе туннельный ток, ответственный за деградацию оксида затвора SiC, выше, чем в кремниевых ключах. Следовательно, при обычно используемой толщине оксидного слоя затвора (50 нм) напряжение управления не должно превышать 15 В, чтобы исключить деградацию оксида из-за туннельных токов. Такое же напряжение обычно используется для включения IGBT. С другой стороны, этого уровня управления недостаточно для решения проблемы модуляции сопротивления канала.

Надежность и долговременная стабильность параметров — вот ключевые параметры, определяющие рыночные перспективы силовых приборов SiC MOSFET. В принципе между SiC и Si нет особой разницы в отношении надежности оксидного слоя. В обоих случаях достаточно высокий ресурс может быть обеспечен, если электрическое поле в оксидном слое не превышает 3 МВ/см и инжектируемый в оксид ток также очень мал. Однако особенностью SiC MOSFET-структур является более высокое электрическое поле, поэтому предполагается, что SiC MOSFET с Trench-затвором превосходят по надежности транзисторы с планарной структурой.

Биполярная деградация

В отличие от биполярных Si IGBT, которым необходим внешний антипараллельный диод, униполярные SiC MOSFET обладают собственными «теплыми» диодами, который может быть использован в качестве FWD. Однако эта возможность ограничена высоким падением прямого напряжения (>3 В) и так называемым эффектом биполярной деградации из-за наличия дефектов кристалла (базальные плоскостные дислокации). В результате биполярной деградации прямое напряжение SiC MOSFET и «теплого» диода увеличивается при высоких токах. В основном это объясняется образованием и накоплением дефектов структуры в режиме прямой проводимости. Ток проводящего «теплого» диода состоит из электронов и дырок, рекомбинирующих внутри дрейфового слоя. Данный процесс создает энергию для активации «базальных дислокаций», приводящих к образованию дефектов. Дефекты SiC влияют на время жизни носителей, определяющее состояние включенного диода, и на концентрацию центров рассеяния, определяющих состояние включенного SiC MOSFET. Таким образом, несмотря на то, что эффект биполярной деградации может быть частично подавлен, следует избегать ис-

пользования «теплого» диода и шунтировать его внешним SiC Шоттки.

Проблемы корпусирования SiC-приборов

Ожидается, что физические свойства карбида кремния позволяют создавать силовые ключи с более высокой блокирующей способностью и меньшими потерями проводимости и переключения. Чтобы использовать весь потенциал SiC-приборов, необходимо рассмотреть важные аспекты, касающиеся их корпусирования.

Работа при высоких температурах

Карбидокремниевые приборы способны работать при более высокой температуре, чем Si IGBT. Это позволяет улучшить эффективность и удельную мощность силовых модулей и, соответственно, уменьшить активную площадь и упростить систему охлаждения. Однако в связи с этим должны быть рассмотрены некоторые принципиальные аспекты.

Во-первых, SiC MOSFET являются униполярными приборами, и их сопротивление канала увеличивается с повышением температуры. Как следствие, повышаются эксплуатационные расходы (OPEX), которые в основном определяются дополнительной мощностью, необходимой для компенсации статических потерь мощности и повышения эффективности охлаждения. Подобные эффекты могут свести на нет снижение стоимости системы, обусловленное уменьшением динамических потерь при температуре выше +180 °С. Данная проблема становится более выраженной для приборов с высоким рабочим напряжением, у которых сопротивление дрейфовой области доминирует над сопротивлением канала. Кроме того, повышение температуры перехода приводит к сокращению срока службы, особенно при воздействии термоциклов.

Во-вторых, необходимо расширять температурный диапазон отсутствующих компонентов: материалов корпуса, драйвера затвора, конденсаторов. В этих условиях маловероятно, что рабочую температуру силовых модулей удастся заметно повысить с внедрением SiC MOSFET, а для существующих конструктивов это вообще невозможно. Однако даже если средняя температура чипов не будет повышаться, уменьшенная активная площадь SiC MOSFET неизбежно создает проблему локальных перегревов, что требует снижения теплового сопротивления силовых модулей.

Снижение активной площади

Как упоминалось ранее, при одинаковых номинальных токах и напряжениях активная площадь чипов SiC MOSFET значительно меньше, чем Si IGBT, соответственно, меньше и площадь теплового контакта между SiC-кристаллами и основанием модуля. Как следствие, модули SiC MOSFET должны работать при очень высоких локальных плотностях тока и мощности. Меньшая активная площадь и особенно меньшая длина краевых областей чипов повышает тепловое сопро-

тивление SiC MOSFET. Таким образом, внедрение технологии карбида кремния увеличивает требования к эффективности охлаждения и равномерности распределения тепла в архитектуре силового модуля. Необходимо снижать количество соединений в пределах теплового пути, использовать эффективные методы отвода тепла, такие как двустороннее охлаждение, а также внедрять новые теплопроводящие материалы.

Помимо растущего спроса на более эффективные методы охлаждения, меньшая активная площадь SiC MOSFET требует разработки новых технологий соединения. В настоящее время для подключения верхнего контактного слоя силовых полупроводниковых приборов используются алюминиевые проводники с максимальным током 25 А и площадью сварного соединения 1,6 мм². Следовательно, при типовой активной области SiC MOSFET с номинальным током 50 А (приблизительно 8 мм²) максимальный ток ограничен на уровне 125 А. Таким образом, пиковый допустимый ток всего в два раза превышает номинальное значение, а ток КЗ и устойчивость к перегрузке значительно снижаются. Для решения этой проблемы разрабатываются новые технологии и материалы, в частности планарные проводники, припойные стыки, гибкие пленки, а также способы металлизации, обеспечивающие большую площадь контакта.

Увеличение скорости коммутации

В сравнении с биполярными Si IGBT униполярные SiC MOSFET имеют очень низкие потери на переключение, что позволяет увеличить частоту переключения, плотность мощности и эффективность силового модуля. Однако для того, чтобы использовать это потенциальное преимущество, необходимо минимизировать влияние паразитных индуктивностей и емкостей корпуса. Наиболее негативное воздействие имеет паразитная индуктивность контура коммутации, приводящая к скачкам напряжения при выключении, снижению скорости коммутации и повышению уровня ЕМІ. Поэтому обычные Al-проводники, используемые при подключении чипов, следует заменить планарными низкоиндуктивными соединителями и применять параллельные коммутационные ячейки. Кроме того, очень важна симметричная компоновка параллельных ключей. Также следует снижать индуктивность цепи затвора, которая в сочетании с демпфирующими резисторами влияет на максимальную скорость переключения и создает связь с паразитной индуктивностью силового контура.

Необходимо учитывать воздействие паразитных емкостей, влияющих на переходные процессы напряжения, скачки тока перегрузки при коммутации, ЕМІ-излучения и паразитные связи. Помимо распределенных емкостей соединительных проводов, большое значение имеет емкость Миллера полупроводникового прибора. Поскольку эта емкость может спровоцировать ложное срабатывание ключа, она рассматривается как ограничивающий фактор для повышения скорости коммутации.

Существует несколько методов подавления данного эффекта: использование отдельных резисторов затвора на включение и выключение, запирающие отрицательным напряжением, замыкание цепи затвора закрытого транзистора, а также ферритовые кольца в цепи затвора для подавления ВЧ-токов.

Высокие электрические поля

Электрические поля в силовых карбидокремниевых приборах примерно в 10 раз выше, чем в кремниевых. Вследствие этого электрическое поле снаружи прибора, проникающее через слой пассивации, также оказывается намного больше. Отсюда вытекают некоторые специфические проблемы для процессов корпусирования и особенно для материалов корпуса. В отличие от технологии пассивации, используемой для чипов Si, в случае силовых SiC-приборов любые загрязнения пассивирующего слоя, такие как частицы примесей, подвижные ионы и лакуны, становятся критичными. Следовательно, для создания перспективных силовых модулей с чипами SiC MOSFET улучшение качества материалов корпуса является обязательным.

Тяговые трансформаторы

Как уже обсуждалось в предыдущих главах, внедрение карбидокремниевых силовых модулей в железнодорожных тяговых системах может заметно улучшить их массогабаритные характеристики. Кроме того, физические свойства SiC позволяют создавать силовые приборы с блокирующим напряжением выше 10 кВ, что открывает новые области применения силовой электроники. Внедрение высоковольтных преобразователей частоты предоставляет возможность значительно уменьшить объем и вес силовых трансформаторов.

В обычных железнодорожных системах тяговый трансформатор непосредственно соединен с контактной АС-сетью. При этом входная частота (частота сети переменного тока) составляет 50 Гц или 16,7 Гц, а потому в трансформаторах используются очень большие и тяжелые сердечники. Увеличение рабочей частоты позволяет значительно уменьшить их массогабаритные показатели. Для этого между АС-сетью и тяговым трансформатором включается высоковольтный преобразователь частоты. В таком случае громоздкий низкочастотный трансформатор может быть заменен среднечастотным меньшего объема. Как правило, высоковольтный преобразователь работает на частотах до нескольких кГц, что позволяет снизить вес трансформатора на 50%, а объем — на 20%.

Недостаток такого решения состоит в том, что конвертер подключается непосредственно к сети переменного тока. Следовательно, используемые в нем силовые модули должны работать при номинальном напряжении АС-сети, то есть не менее 25 кВ. В принципе это возможно при использовании ключей на основе SiC, объединенных в несколько групп. Однако по потерям проводимости в таком диапазоне напряжений биполярные приборы, такие как

IGBT, имеют преимущество перед униполярными. Например, прямое падение сигнала на SiC IGBT с номинальным напряжением 27 кВ, измеренное на маломасштабном прототипе, составляет 6,5 В, в то время как на сопоставимом SiC MOSFET оно превышает 15 В. В принципе создание биполярных приборов с такими характеристиками возможно, но для этого необходимо преодолеть ряд проблем.

Помимо вопросов, связанных с надежностью и нагрузочной способностью SiC MOSFET, обсуждавшихся ранее, применение SiC IGBT в твердотельных трансформаторах требует дальнейшего снижения потерь проводимости, и эта проблема является блокирующей. Несмотря на то, что SiC IGBT превосходят униполярные аналоги по номинальному напряжению, падение 6,5 В, измеренное при токе 20 А, дает плотность мощности потерь около 400 Вт/см², что требует недостижимой эффективности системы охлаждения. Для снижения потерь проводимости у биполярных силовых приборов время жизни носителей в SiC-слоях должно быть увеличено с 200 нс не менее чем до 1 мс. В литературе описаны соответствующие стратегии, обычно называемые процессами повышения продолжительности жизни. Тем не менее экспериментальные результаты указывают на то, что существует принципиальный предел времени жизни носителей, составляющий приблизительно 5 мкс. Необходимо дальнейшее снижение плотности дефектов, образующихся при эпитаксиальном росте. Этот вопрос находится в стадии рассмотрения, и никакими серьезными прогнозами на ближайшие десять лет сделать невозможно.

Другие широкозонные материалы

Кроме карбидокремниевых полупроводников, используемых в SiC MOSFET- и биполярных силовых SiC-приборах, производятся и другие широкозонные материалы, такие как GaN и Diamond. Но до настоящего времени появление на рынке вертикальных силовых приборов на основе этих материалов ограничено наличием подложек соответствующего диаметра и с требуемыми электрическими свойствами. Например, диаметр отдельных подложек GaN и Diamond не превышает 30 мм, тогда как для SiC доступны подложки диаметром до 150 мм. Появления силовых приборов на основе данных технологий не следует ожидать в течение ближайших десяти лет.

Литература

1. Kimoto T., Cooper J.A. Fundamentals of Silicon Carbide Technology. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2014.
2. Zhou W., Zhong X., Sheng K. High Temperature Stability and the Performance Degradation of SiC MOSFETs // IEEE Transactions on Power Electronics. 2014. Vol. 29. No. 5.
3. Yu L. C., Dunne G. T., Matocha K. S., Cheung K. P., Suehle J. S., Sheng K. Reliability Issues of SiC MOSFETs: A Technology for High-Temperature Environments // IEEE Transactions on Device and Materials Reliability. 2010. Vol. 10. No. 4.

4. Lelis J., Green R., Habersat D. B., El M. Basic Mechanisms of Threshold-Voltage Instability and Implications for Reliability Testing of SiC MOSFETs // IEEE Transactions on Electron Devices. 2015. Vol. 62. No. 2.
5. Lelis J. et al. Time dependence of bias-stress induced threshold-voltage instability measurements. Semiconductor Device Research Symposium International. College Park, MD, 2007.
6. Lelis J. et al. Time Dependence of Bias-Stress-Induced SiC MOSFET Threshold-Voltage Instability Measurements // IEEE Transactions on Electron Devices. 2008. Vol. 55. no. 8.
7. Jahdi S. et al. An Analysis of the Switching Performance and Robustness of Power MOSFETs Body Diodes: A Technology Evaluation // IEEE Transactions on Power Electronics. 2015. Vol. 30. No. 5.
8. Schuderer J., Vemulapati U., Traub F. Packaging SiC power semiconductors — Challenges, technologies and strategies. Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA), 2014 IEEE Workshop. Knoxville, TN, 2014.
9. Wang Y., Dai X., Liu G., Wu Y., Li D., Jones S. Status and Trend of SiC Power Semiconductor Packaging. Electronic Packaging Technology (ICEPT), 16th International Conference. Changsha, 2015.
10. Liu C.n-K. et al. Development of packaging technologies for SiC power module. Microsystems, Packaging. Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT), 10th International. Taipei, 2015.
11. Liang Z., Ning P., Wang F. Advanced packaging of SiC power module for automotive applications. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver, CO, 2013.
12. Grummel B., McClure R., Zhou L., Gordon A. P., Chow L., Shen Z. J. Design consideration of high temperature SiC power modules. Industrial Electronics, IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE. Orlando, FL, 2008.
13. Hugo N., Stefanutti P., Pellerin M., Akdag A. Power electronics traction transformer. Power Electronics and Applications. European Conference. Aalborg, 2007.
14. Dujic D., Kieferndorf F., Canales F., Drofenik U. Power electronic traction transformer technology. Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC) 7th International. Harbin, China, 2012.
15. Casarin J., Ladoux P., Martin J., Chauchat B. AC/DC converter with medium frequency link for railway traction application. Evaluation of semiconductor losses and operating limits. SPEEDAM 201. Pisa, 2010.
16. Steiner M., Reinold H. Medium frequency topology in railway applications. Power Electronics and Applications, European Conferenc. Aalborg, 2007.
17. Tanabe H., Kojima T., Imakiire A., Fuji K., Kozako M., Hikita M. Comparison performance of Si-IGBT and SiC-MOSFET used for high efficiency inverter of contactless power transfer system. IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. Sydney, NSW, 2015.
18. Wang G. et al. Static and dynamic performance characterization and comparison of 15 kV SiC MOSFET and 15 kV SiC n-IGBTs. IEEE 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD). Hong Kong, 2015.
19. Fukuda K. et al. Development of ultrahigh voltage SiC power devices. International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 — ECCE ASIA). Hiroshima, 2014.
20. Brunt E. V. et al. 22 kV, 1 cm², 4H-SiC n-IGBTs with improved conductivity modulation. IEEE 26th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD). Waikoloa, HI, 2014.
21. Brunt E. V. et al. 27kV, 20A 4H-SiC n-IGBTs // Materials Science Forum. 2015. Vol. 821.
22. Kaminski N., Hilt O. SiC and GaN devices — wide bandgap is not all the same // IET Circuits, Devices & Systems. 2014. Vol. 8. No. 3.
23. Jones E. A., Wang F., Ozpineci B. Application-based review of GaN HFETs. Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA). IEEE Workshop. Knoxville, TN, 2014.
24. Millán J., Godignon P., Perpiñà X., Pérez-Tomás A., Rebollo J. A Survey of Wide Bandgap Power Semiconductor Devices // IEEE Transactions on Power Electronics. 2014. Vol. 29. No. 5.
25. Kachi T., Kanechika M., Uesugi T. Automotive Applications of GaN Power Devices. IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS). Waikoloa, HI, 2011.
26. Ishida M., Uemoto Y., Ueda T., Tanaka T., Ueda D. GaN power switching devices. Power Electronics Conference (IPEC) International. Sapporo, 2010.
27. Kohn E., Denisenko A. CVD Diamon— The Next Generation Electronic Material. IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium. San Antonio, TX, 2006.