

Переключатели на основе карбида кремния (SiC):

характеристики, преимущества и применение

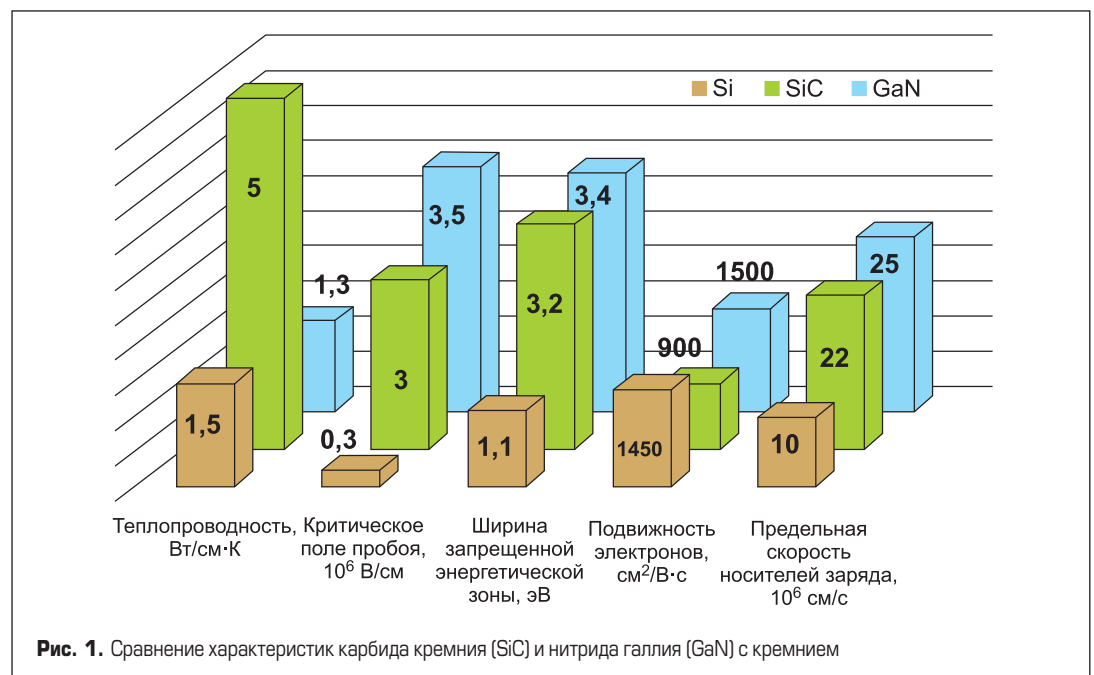
Уже несколько лет широкозонные полупроводники остаются популярной темой, они по праву перешли из категории технологий будущего в категорию крупного рыночного сегмента, их прогнозируемый прирост на рынке — 33,4% CAGR в течение следующих пяти лет и достижение \$1,82 млрд до 2024 года [1]. Широкозонные устройства изготавливаются с помощью либо карбида кремния (SiC), либо нитрида галлия (GaN). До настоящего времени в большем количестве применялись материалы с карбидом кремния — около 98% в 2018 году, согласно исследователям Yole Développement [2], который прогнозирует, что автотранспорт станет основной движущей силой на рынке, а 50% полупроводниковых переключателей питания в 2024 г. будут SiC-приборами.

Так что же мы имеем в виду, когда говорим о широкозонных устройствах? Это полупроводники, изготавливаемые из материалов, которые характеризуются тем, что требуется довольно высокая энергия, чтобы передвигать электроны из атомной «валентной» зоны в их зону «проводимости». Эта «запрещенная зона» измеряется в электрон-вольтах (эВ), для сравнения, показатель для обычного кремния (Si) составляет 1,1 эВ, для SiC — это 3,26 эВ, а для GaN — 3,4 эВ. Широкозонные устройства также име-

ют лучшее насыщение скорости электронов, а карбид кремния — хорошую теплопроводность. Эти и другие отличия, в сравнении с кремнием на рис. 1, означают, что широкозонные устройства обладают определенными свойствами, которые дают им значительные преимущества.

Широкозонные устройства имеют в 10 раз лучший показатель напряжения разрушения.

Как видно на рис. 1, имея в 10 раз лучшие характеристики напряжения разрушения с данной толщиной, чем кремний, приборы, использующие материалы на основе карбида кремния, могут обладать в 10 раз более тонким дрейфовым слоем и в 10 раз большей концентрацией легирующей примеси. Это означает, что в открытом состоянии сопротивление намного ниже, чем кремний с таким же запирающим напряжением, из чего следует и меньшая рассеиваемая мощность на такой же области кристалла в сравнении с кремнием. Благодаря своей чрезвычайно высокой теплопроводности SiC-кристалл эффективно проводит теплоотдачу из корпуса компонента, тем самым обеспечивая высокую мощность в минимальном пространстве. Ток утечки тоже уменьшается в результате характеристики напряжения разрушения, особенно при высокой температуре.



Маленькие габариты означают низкую электроемкость и высокую скорость

Маленький размер кристаллов, достигаемый при помощи высокого запирающего напряжения в широкозонных полупроводниках, создает низкую внутреннюю электроемкость прибора. Во время переключения режимов электрическую емкость необходимо заряжать и разряжать в каждом цикле, изображая циркулирующий ток и рассеяние мощности, поэтому SiC и GaN имеют преимущества перед Si. Например, заряд затвора, благодаря электроемкости затвора-истока и затвора-стока, может достигать несколько микрокулонов в БТИЗ (IGBTs) и сотен нанокюлонов в МОП-транзисторах, но в SiC-приборах он достигает только несколько десятков нанокюлонов, даже в таких мощных приборах, как FF45MR12W1M1_B11 from Infineon, рассчитанных на 1200 В и 25 А (рис. 2). Это помогает не только быстро переключаться, но и удерживать на низком уровне требования по питанию затвора — большим приборам БТИЗ нужно несколько ватт, чтобы управлять своими затворами, в то время как приборам SiC и GaN для этого обычно необходимы милливольты.

Высокая температура возможна в широкозонных приборах

Среди важных свойств материалов SiC и GaN надо указать их способность работать при более высокой температуре перехода, чем материалы Si. Некоторые производители отмечают, что их приборы действуют при максимальной температуре, превышающей +500 °С, и это практически является монтажным граничным значением приборов, выполненных на основе кремния. Однако лучшие показатели создают большую разность между мощностью и нагрузкой в условиях тепловых скачков в широкозонных приборах. Перепады температуры критически важных параметров, таких как сопротивление во включенном состоянии и рассеяние потока в затворе, в SiC-приборах значительно ниже, чем в Si-устройствах.

Преимущества в применении

Основное преимущество при эксплуатации широкозонных приборов — меньшие потери во время переключения. Целевые показатели эффективности для таких устройств, как серверные блоки питания, сейчас регулярно выше 98%, на практике таких цифр можно достичь при помощи технологии SiC или GaN. Однако нельзя получить оптимальные решения, если такие старые технологии, как МОП-транзисторы на основе кремния, просто заменить карбидом кремния. В подобных случаях время переключения ускорится, обеспечивая меньшие потери в приборе, но электромагнитные помехи будут гораздо большими, и понадобится дополнительный снабдинг и фильтрация, что вернет потери. Полное преимущество возможно, когда потери во вре-



Рис. 2. Модуль SiC от Infineon, имеющий мощность 1200 В и 25 А с общим зарядом затвора 62 нКл

мя переключения будут низкими и удастся сохранить внешние компоненты, в частности магнитные элементы, которые обычно уменьшаются в размере и стоимости при увеличении частоты. С повышением рабочей частоты критически важным фактором становится и топология печатной платы. Оптимальное решение зависит от запланированной стоимости, размера и веса — например, при применении электродвигательных приводов в автотранспорте на первый план выдвигается эффективность, габариты и вес, которые потенциально продлевают время функционирования. Во время использования такое сильное влияние на внешние компоненты отсутствует, поскольку задействованные «магнитные элементы» — это обмотки двигателя, рассчитанные на вращение и питание, а не на частоту переключений. Именно поэтому обычно не выбирают слишком высокие частоты переключений электродвигательного привода.

В применении промышленного электропривода вес не является большой проблемой, но улучшение операционной эффективности и габаритов может привести к тому, что больше приводов будет помещаться в отделении, тем самым потенциально сберегая драгоценное место на фабрике и повышая продуктивность.

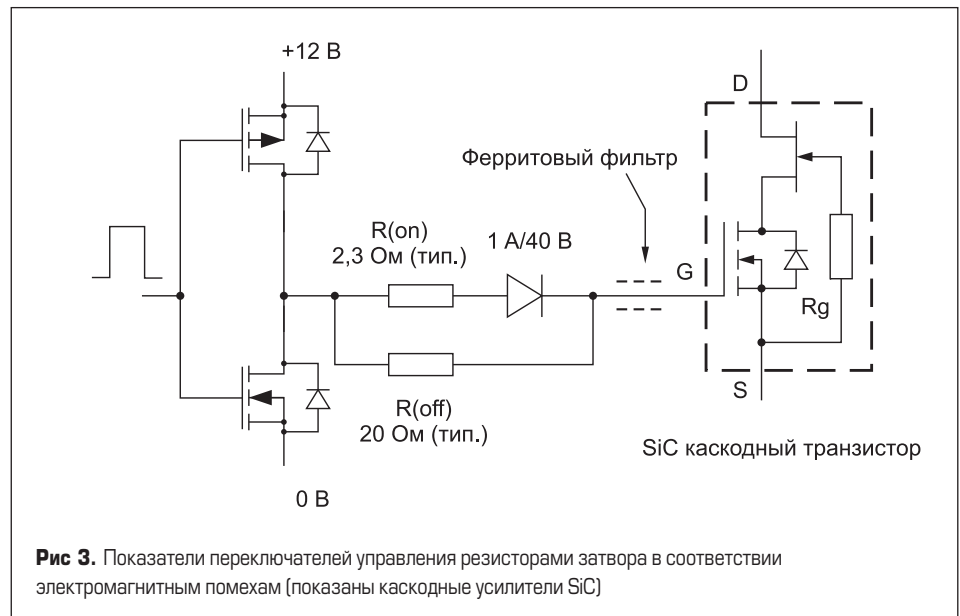
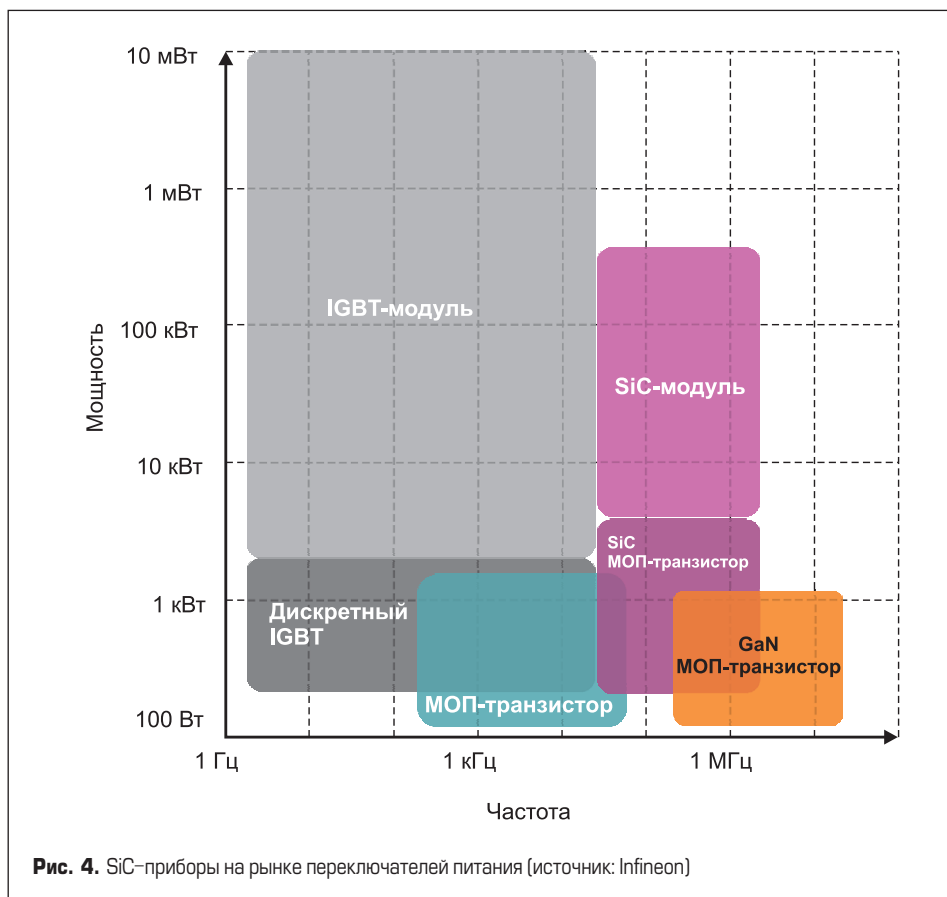


Рис. 3. Показатели переключателей управления резисторами затвора в соответствии электромагнитным помехам (показаны каскодные усилители SiC)

Особенности дизайна

В процессе разработки широкозонных приборов необходимо учитывать несколько факторов. Напряжение механизма затвора становится критически важным для оптимального функционирования переключений и меняется в зависимости от типа. Например, фирма Littelfuse (IXYS) рекомендует рабочие параметры +20/-5 В, а максимальные +22/-6 В для своих SiC МОП-транзисторов LSIC1MO120E0080. Согласно информации в таблице данных, пороговое напряжение включения может достигать 1,8 В, но при наименьшем сопротивлении во включенном состоянии должно составлять 20 В. Приборы будут выключаться, если применять 0 В к затвору, но отрицательное напряжение обычно рекомендуется для того, чтобы компенсировать влияние нестационарности, вызванное чрезвычайно быстрой скоростью *di/dt* в выводе истока, что вступает в реакцию с исходным пакетом и объединением индуктивного сопротивления с целью образования переходного напряжения, которое самопроизвольно включает прибор. Широкозонные приборы будут переключаться в течение наносекунд, но на практике различные дизайны специально замедляют время переключения, делая это при помощи добавочных резисторов затвора и ферритовых фильтров, чтобы избежать электромагнитных помех и больших проблем со скоростью (*di/dt*) (рис. 3).

Во многих вариантах применения, таких как мостовая схема в инверторах, появляется коммутация, то есть протекание электрического тока в обратном направлении в переключателях, что вызвано индуктивной нагрузкой. В приборах БТИЗ параллельное соединение диодов необходимо, чтобы произошла коммутация, но в МОП-транзисторах паразитный диод, присутствующий изначально, в некоторых случаях может заменить внешний диод. В МОП-транзисторах на основе кремния диод относительно медленный и сбрасывает высокое напряжение, поэтому он неэффективен. Диод в SiC МОП-транзисторах намного быстрее, но все равно имеет относительно высокое падение напряжения в режиме прямого



тока (3,3 В) в сравнении с быстрым диодом в Si-приборах. У приборов GaN нет паразитного диода, но они могут проводить ток по своему каналу в обратном направлении, однако без обратного заряда переключения.

Доступные приборы

Для применения на высоких частотах, чтобы избежать паразитного эффекта, преимуще-

ство отдается безвыводным вариантам для поверхностного монтажа, например, таким как корпус PG-HSOF-8-3, который используется в Infineon для GaN-приборов. Хотя большинство поставщиков предлагает части в корпусах TO-247 для удобства с выводами теплоотвода и простой способ обновления старой технологии (IGBT- или МОП-транзисторов) в таком же корпусе. В стандартных приборах замыкающие контакты — это SiC МОП-

транзисторы, но доступны и размыкающие контакты SiC JFET. Некоторые поставщики, в частности UnitedSiC, предлагают каскадные усилители — сочетание SiC JFET- и МОП-транзисторов на основе кремния. Эти приборы имеют не только температурные и скоростные преимущества SiC-устройств, но и удобство механизма затвора МОП-транзисторов на основе кремния. У них нет паразитного диода, но они проводят ток в обратном направлении с низким перепадом напряжения и без обратного восстановления. Они также доступны в многоярусных вариантах для работы в условиях повышенного напряжения.

Применение

SiC-полупроводники прочно закрепились в блоках питания AC/DC на этапах коррекции и модифицирования коэффициента мощности; центры обработки данных являются основным фактором, поскольку нуждаются в большей энергонапряженности и энергосбережении. Сегодня SiC-приборы распространены в электродвигательных приводах и инверторах, чаще всего используются в зарядных устройствах для электромобилей. Инверторы тяги в электромобилях и других областях применения, в частности на железной дороге, также переходят от IGBT- к SiC-приборам. Другие технологии тоже существуют, но SiC-материалы начинают доминировать на высоких частотах и в большом диапазоне режимов работы на мощности (рис. 4).

Литература

1. www.fiormarkets.com/report/global-wbg-power-devices-market-growth-2019-2024-372736.html
2. www.Yole.fr
3. www.tme.eu