

# ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ SiC-ПРИБОРЫ

**АНДРЕЙ ЕРШОВ**, инженер-разработчик

*В статье рассматриваются основные свойства карбидокремниевых полупроводниковых приборов. Приводятся примеры их применения. Акцент сделан на полевых транзисторах с p-n-переходом.*

Преимущества карбидокремниевых (SiC) полупроводниковых приборов описаны довольно подробно, поэтому мы не будем на них останавливаться, но лишь упомянем главные из них:

- широкая запрещенная зона, позволяющая увеличить максимально допустимое напряжение;
- теплопроводность SiC в 3–3,5 раза выше, чем у кремния (Si);
- сопротивление канала на единицу площади  $R_{dsA}$  у SiC заметно ниже, чем у Si.

Благодаря этим свойствам в настоящее время выпускаются SiC FET с планарной и trench-структурами с максимально допустимым напряжением 650–1700 В. Можно утверждать, что SiC FET с номинальным напряжением до 1200 В безоговорочно выигрывают у IGBT по всем показателям. Номинальное напряжение 1200 В является граничным значением, начиная с которого потери на проводимость в IGBT при больших токах могут оказаться ниже, чем у SiC FET. Однако потери на коммутацию у IGBT в любом случае выше, чем у SiC FET. Недостатком SiC FET является относительно низкая подвижность носителей.

В схемах с жесткой коммутацией SiC FET и SiC-диоды заметно выигрывают у кремниевых аналогов из-за меньших потерь, особенно при коммутации в режиме непрерывного тока за счет гораздо меньшего заряда обратного восстановления ( $Q_{RR}$ ) у SiC-диодов. В схемах с мягким переключением SiC FET выигрывают у кремниевых аналогов за счет меньшей величины общей емкости  $C_{OSS}$ , что позволяет увеличить рабочую частоту. За счет улучшения динамических свойств SiC FET можно увеличить скорость изменения напряжения до 100–200 В/нс, не меняя время жизни носителей заряда. Меньшее сопротивление открытого канала  $R_{DS(ON)}$  также играет на стороне SiC FET.

Еще одним преимуществом SiC FET является гораздо меньшая зависимость порогового напряжения затвора  $V_{TH}$  от температуры. Эта особенность, а также гораздо лучшая

теплопроводность и, следовательно, большая рассеиваемая мощность позволяет использовать данные приборы

в устройствах защиты электрических цепей от экстратоков и токов короткого замыкания. Особенно выгодно исполь-

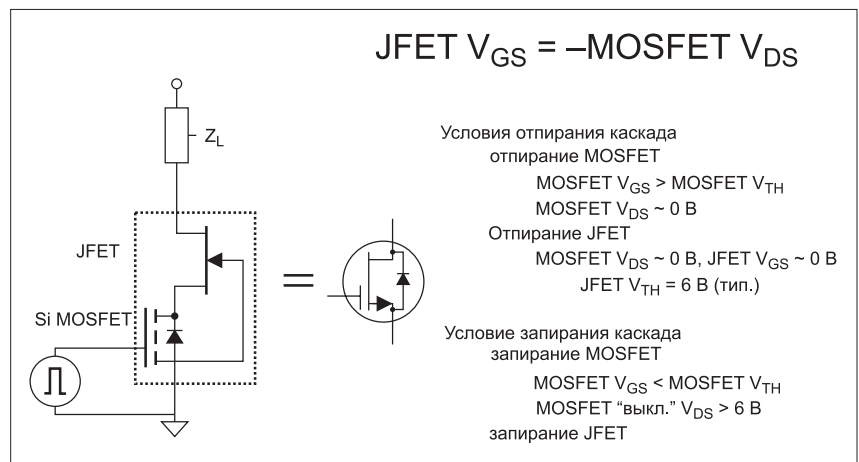


Рис. 1. Схема каскада SiC JFET

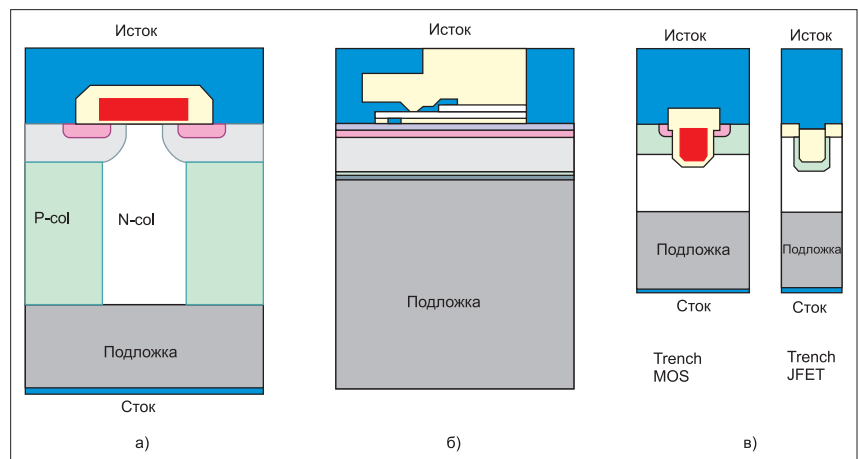


Рис. 2. а) 650-В структуры Si MOSFET; б) GaN HEMT FET; в) низковольтный Trench Si MOSFET с Trench Si JFET, составляющие каскод

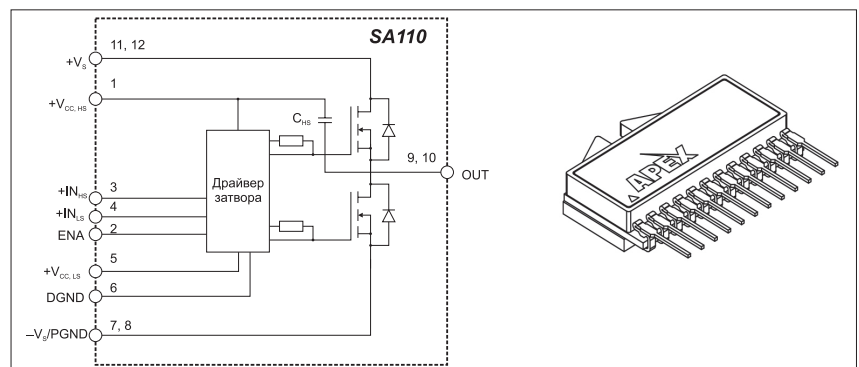


Рис. 3. Интегрированный в один корпус полумостовой каскод SiC JFET и драйвер затвора

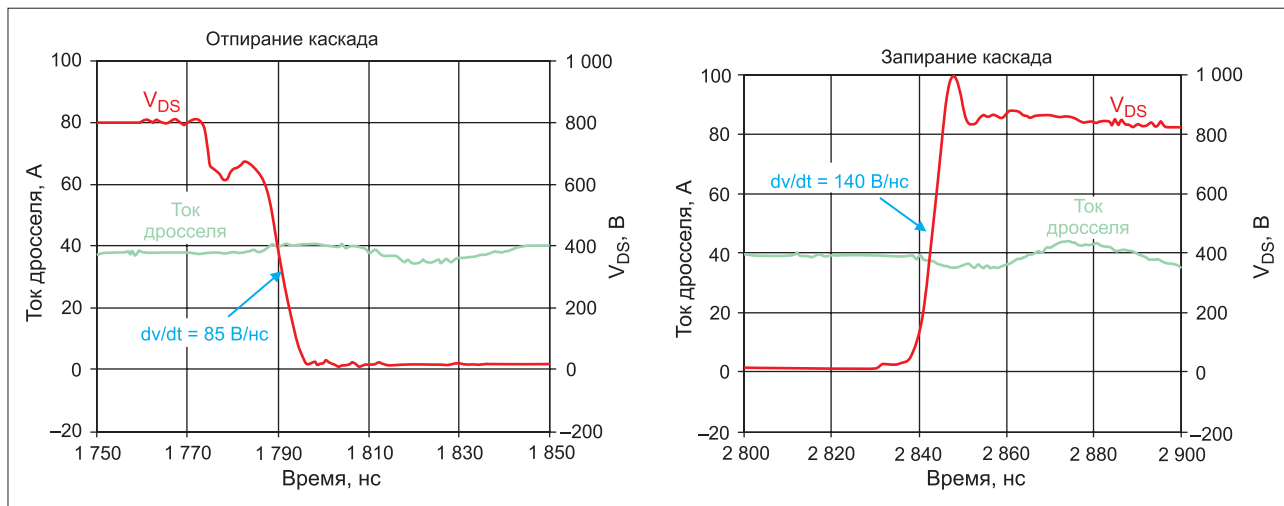


Рис. 4. Осциллограммы работы полумостовой схемы на рисунке 3

зование в этих случаях SiC JFET (полевые транзисторы с *p-n*-переходом) – у них минимальное сопротивление открытого канала  $R_{DS(ON)}$  и отличная способность рассеивать энергию.

Заметим, что SiC JFET несколько недооценены разработчиками. Компания UnitedSiC использует каскодную схему, в которой высоковольтный SiC JFET включен последовательно с быстрым низковольтным Si MOSFET. Схема каскода показана на рисунке 1: в одном корпусе установлены 25-В SiC MOSFET и высоковольтный SiC JFET. В отличие от случаев, когда драйвер управляет затвором высоковольтного прибора, в каскодной схеме время коммутации ключа плохо управляется с помощью резистора затвора. Компания UnitedSiC предлагает ключи с разным временем коммутации, отрегулированным еще на этапе производства.

Соединив последовательно пять подобных каскодов, в каждый из которых входит 1700-В SiC JFET, компания получила полумостовой модуль с нормированным напряжением 6500 В и максимальным током 200 А. Устройство управляется напряжением 0–12 В. Из-за низкого заряда затвора  $Q_g$  не требуются отдельные цепи для включения и выключения ключа, как это делается для управления IGBT или высоковольтными SiC MOSFET.

На рисунке 2 схематично с соблюдением масштаба показаны 650-В структуры кремниевого Si MOSFET с суперпереходом с вертикальным каналом GaN HEMT FET с боковым каналом и низковольтный Trench MOSFET с Trench SiC JFET, составляющие каскод (см. рис. 1). Касательно этих приборов на сегодняшний день справедливы следующие значения параметров. Сопротивление канала на единицу площади  $R_{dsA}$  у GaN HEMT FET составляет 3–6 мОм·см<sup>2</sup>, у SiC Trench MOSFET и пла-

нарных MOSFET эта величина колеблется в пределах 2–4 мОм·см<sup>2</sup>, а у SiC JFET компании UnitedSiC сопротивление  $R_{dsA}$  удалось снизить до 0,75 мОм·см<sup>2</sup>. Соответственно, уменьшились размеры кристалла (см. рис. 1) и, следовательно, его стоимость и паразитная емкость. У ключей GaN HEMT FET – отличные динамические характеристики, но эти ключи еще заметно дороже SiC-приборов.

Улучшение рабочей частоты, уменьшение длительности фронтов приводит к появлению звона и увеличению длительности колебательного переходного процесса и, следовательно, к увеличению потерь. Уменьшить эти негативные последствия можно за счет уменьшения паразитных индуктив-

ностей и емкостей силового каскода. Наилучшим образом это достигается при интегрировании в одном корпусе драйвера затворов и силовых ключей. На рисунке 3 показан пример такой интеграции от компании Arhex: полумостовой каскод, составленный из ключей SiC JFET с нормированным напряжением 1200 В и сопротивлением открытого канала  $R_{DS(ON)} = 35$  мОм, встроен в корпус с драйвером затворов. Размер корпуса: 32×29 мм.

На рисунке 4 показаны осциллограммы работы этой полумостовой схемы. Как видно из рисунка, существенные перенапряжения не возникают ни в процессе открытия, ни в процессе закрытия ключей; отсут-

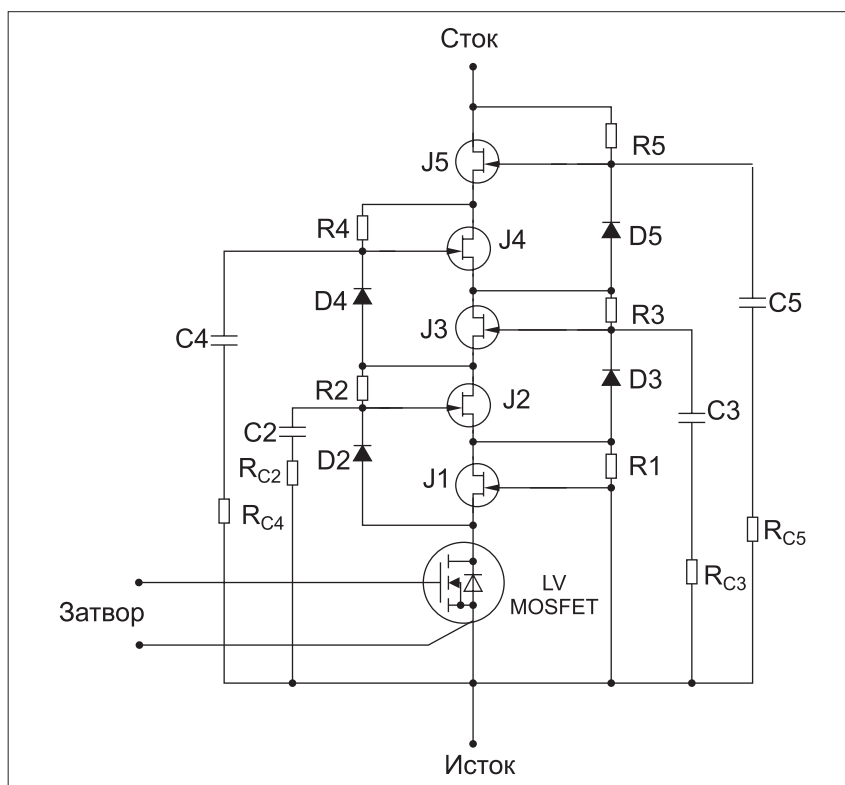


Рис. 5. Схема суперкаскода

Таблица. Сопротивление канала на единицу площади  $R_{dsA}$  у SiC

Максимально допустимое напряжение, В	Сопротивление канала на единицу площади $R_{dsA}$ , мОм
1700	3
3300	12
6500	50
10000	120

ствуется и колебательный переходный процесс, обычно возникающий при коммутации.

Увеличение максимального напряжения прибора достигается либо путем увеличения размера кристалла, либо с помощью последовательного соединения нескольких модулей. В таблице представлены значения сопротивления канала на единицу площади  $R_{dsA}$  у SiC. Таким образом, чтобы получить ключ с максимально допустимым напряжением 6500 В и сопротивление  $R_{dsA} = 12$  мОм, требуется либо включить параллельно четыре кристалла на напряжение 6500 В, либо соединить последовательно четыре кристалла на напряжение 1700 В. Разумеется, последний вариант предпочтительнее – он гораздо экономичнее и обеспечивает лучшие параметры.

Исходя из этих соображений, компания UnitedSiC создала суперкаскод, схема которого приведена на рисунке 5. Он состоит из четырех последовательно соединенных 1700-В кристаллов SiC JFET. Заметим, что каскод управляется одним драйвером затвора. Конструктивное исполнение суперкаскода показана

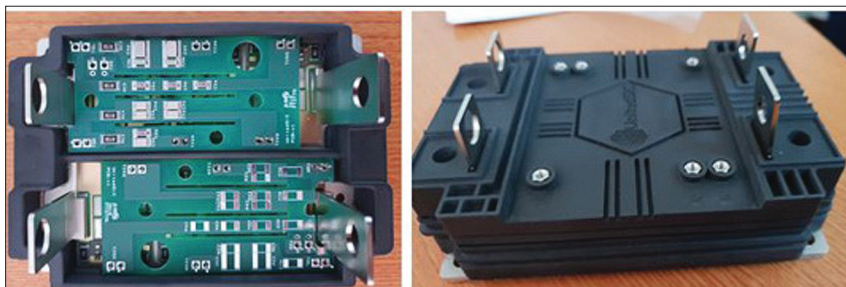


Рис. 6. Конструктив суперкаскода

но на рисунке 6. Аналогичное решение можно использовать и для построения высоковольтного ключа из SiC MOSFET, но при этом придется использовать четыре драйвера затвора с малым разбросом времени распространения сигнала.

Помимо SiC MOSFET широко распространены SiC-диоды с нормированным обратным напряжением 650, 1200 и 1700 В. Их заряд обратного восстановления  $Q_{RR}$  в SiC-диодах Шоттки заметно меньше, чем у кремниевых аналогов. Следовательно, существенно сократятся потери  $E_{ON}$  при жесткой коммутации в режимах непрерывного тока.

Чтобы повысить стойкость SiC-диодов Шоттки к перенапряжениям, производители добавляют в диоды области с  $p-n$ -переходами, которые уменьшают утечки и повышают стойкость к перенапряжениям. В общем случае слабым местом всех SiC-диодов является плохая устойчивость к всплескам напряжения. Падение напряжения на них достигает 4–6 В, тогда как у кремниевых диодов

эта величина обычно не превышает 2–2,5 В. Учитывая, что размер кристалла SiC-диода невелик, всплески напряжения могут привести к перегреву.

Устранить этот недостаток удастся за счет использования более тонких пластин; при этом уменьшается падение напряжения на диоде, и уменьшается тепловое сопротивление. Кроме того, используются более совершенные методы корпусирования в корпусах TO и DFN, позволяющие заметно уменьшить тепловое сопротивление «кристалл–корпус». Все эти меры обеспечили устойчивость SiC-диодов к 8–12-кратным перегрузкам по току.

В заключение заметим, что поводом для статьи послужил, на наш взгляд, некоторый перекокс в профессиональных СМИ в сторону SiC MOSFET и практически полное невнимание к полевым транзисторам с  $p-n$ -переходом SiC JFET. Мы постарались очень кратко пояснить, отчего такое положение дел кажется нам несправедливым. Надеемся, читатели хотя бы отчасти разделят нашу точку зрения. ◻