

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ GaN, SiC и SuperJunction

Д-р ДЖЕРАЛЬД ДЕБОЙ (DR. GERALD DEBOY),
РЕНЕ МОНТ (RENE MENTE), магистр наук, Infineon Technologies

В статье сравниваются преимущества и недостатки силовых транзисторов, изготовленных по технологиям GaN, SiC и Superjunction, рассматриваются области их применения.

Появление транзисторов Superjunction на рынке 20 лет тому назад опровергло представления о невозможности улучшить параметры стандартных кремниевых транзисторов, например сопротивление в открытом состоянии. Революционные изменения, которые произошли в то время, определили ныне существующие стандарты. Теперь все транзисторы из линейки компании Infineon классов 25–900 В превосходят те ограничения кремниевой технологии, которые предрекал тайваньский инженер Чэньмин Ху [1] в 1978 г. Эти ограничения были преодолены и транзисторами Superjunction с защитным затвором [2–3] классов 25–300 В.

Современные технологии позволяют использовать MOSFET в широком ряде приложений, начиная с устройств очень малой мощности, к которым относятся зарядники для сотовых телефонов, и заканчивая системами быстрой зарядки электромобилей от трехфазной сети мощностью выше 100 кВт. Ключевым фактором успеха в совершенствовании полупроводников этого класса стало постоянное уменьшение величины сопротивления в открытом состоянии, которое зависит от площади кристалла, что наряду с меньшими потерями проводимости и коммутационными потерями позволяло уменьшать стоимость устройств каждого следующего поколения.

В результате появилась возможность использовать силовые ключи с очень малым сопротивлением в открытом состоянии в приложениях высокой мощности, например в AC/DC- и DC/DC-каскадах электропитания серверов или в импульсных источниках питания для телекоммуникационного оборудования. В настоящее время КПД кремниевых устройств из расчета на один каскад превышает 98%, а КПД однофазных источников питания (например, 3 кВт, 12 В постоянного тока) – больше 96%.

Какие же характеристики широкозонных силовых устройств позволили преодолеть ограничения, свойственные кремниевой технологии?

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Ключевой вопрос снижения величины сопротивления в открытом состоянии и площади кристалла при заданном напряжении пробоя может быть решен разными способами. Например, SiC MOSFET, в основном, соответствуют тем же требованиям, что и стандартные высоковольтные транзисторы. Однако из-за более высокой напряженности поля пробоя способность выдерживать большее напряжение при том же вертикальном размере канала у SiC MOSFET заметно лучше. Расчетный показатель $R_{ON} \cdot A$ при использовании карбидкремниевой технологии в три раза меньше,

чем у стандартных кремниевых транзисторов.

Проводимость транзисторов GaN HEMT осуществляется с помощью нелегированного слоя, или двумерного электронного газа (ДЭГ). У этих устройств показатель $R_{ON} \cdot A$ еще меньше по сравнению с SiC MOSFET. В настоящее время $R_{ON} \cdot A$ транзисторов SiC MOSFET и GaN HEMT классов 600 и 650 В, соответственно, в два–четыре раза меньше, чем у самых лучших кремниевых устройств, предлагаемых на рынке.

У приборов Superjunction и SiC MOSFET – вертикальная структура, т. е. ток нагрузки течет с поверхности транзистора в вертикальном направлении в сторону подложки на нижней стороне, а у GaN HEMT – структура горизонтальная. Выводы истока, затвора и стока находятся на поверхности полупроводника и соединяются через отдельные металлизированные слои. На рисунке 1 показаны соответствующие полупроводниковые структуры.

Первым наиболее информативным для приложения параметром является температурная зависимость сопротивления канала в открытом состоянии. У полупроводников Superjunction величина температурного коэффициента определяется рассеиванием носителей на решетках и примесных атомах, а ток в транзисторах GaN HEMT протекает, как правило, по нелегированной и, следовательно, свободной от примесей кристаллической структуре. По этой причине у транзисторов рассматриваемого типа – очень высокая подвижность электронов, и их сопротивление в меньшей мере зависит от температуры, чем у кремниевых аналогов.

Два частично перекрывающихся эффекта наблюдаются у транзисторов SiC MOSFET: с одной стороны, сопротивление в зоне дрейфа повышается с ростом температуры, что, однако, почти полностью компенсируется одно-

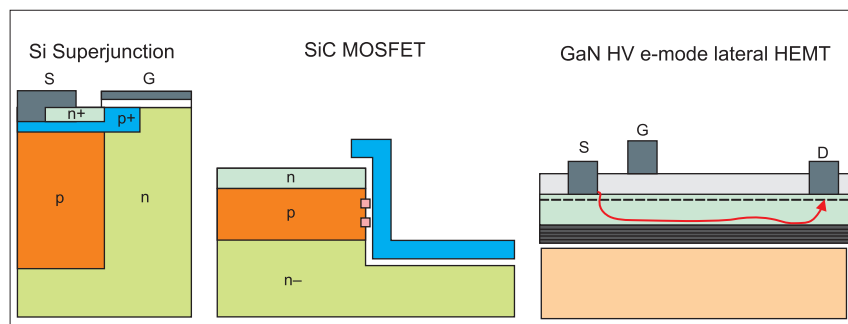


Рис. 1. Структуры транзисторов Superjunction, SiC MOSFET и GaN HV e-mode HEMT

временным повышением проводимости в канале. В результате сопротивление в открытом состоянии практически не зависит от температуры, особенно для устройств, относящихся к классам напряжения 600/650 В, с относительно большим вкладом сопротивления канала MOSFET в суммарное сопротивление. На рисунке 2 приводится соответствующее сравнение.

Характеристики канала также влияют на другие параметры, к которым относятся заряд затвора и уровень напряжения, управляющего транзистором. Поскольку двумерный электронный газ транзистора GaN HEMT изначально проводит ток (необходимо принять дополнительные меры для реализации нормально закрытого GaN HEMT), он переключается при очень малых управляющих напряжениях. Напротив, транзисторам SiC MOSFET требуется сравнительно высокое управляющее напряжение, что обусловлено низкой подвижностью носителей заряда в МОП-канале. Причина этого явления заключается в относительно высокой плотности дефектов у интерфейса между SiC-структурой и оксидом затвора. Особенно заметно проявляется этот эффект в горизонтальных ДМОП-структурах. С учетом этого обстоятельства компания Infineon Technologies стала использовать trench-структуру, в которой канал размещен в плоскости кристалла с существенно меньшей плотностью дефектов.

Такой подход позволяет не только улучшить характеристики передачи, но и обеспечивает более высокую надежность полупроводникового устройства за счет существенно меньшего напряжения электрического поля оксидного слоя в активном состоянии. Устройства Superjunction обладают наибольшим зарядом затвора из-за более длинного канала и совмещения затворного электрода с вертикальными n -областями. В отличие от транзисторов Superjunction, заряд затвора транзисторов GaN HEMT при том же сопротивлении в открытом состоянии составляет 5,8 нКл, т.е. меньше более чем на порядок. Данный показатель в пять раз меньше заряда затвора SiC MOSFET. Однако при этом следует также учитывать потери в управляющей RC-цепи и непрерывный затворный ток в биполярных структурах. Суммарная мощность для управления транзисторами GaN HEMT примерно на порядок меньше, чем в случае с SiC MOSFET.

Это важное обстоятельство, особенно если речь идет о ВЧ-приложениях. На рисунке 3 сравниваются значения заряда затвора при использовании

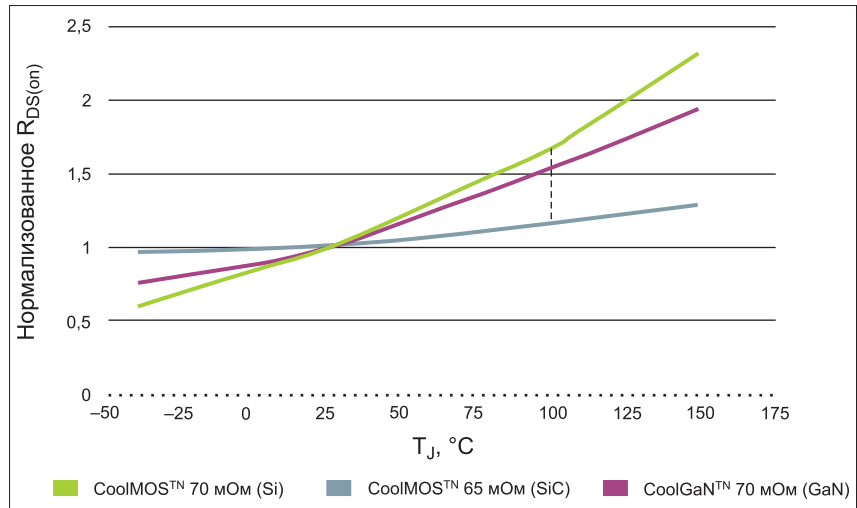


Рис. 2. Сравнение значений сопротивления в открытом состоянии как функции температуры транзисторов Superjunction, GaN HEMT и SiC MOSFET

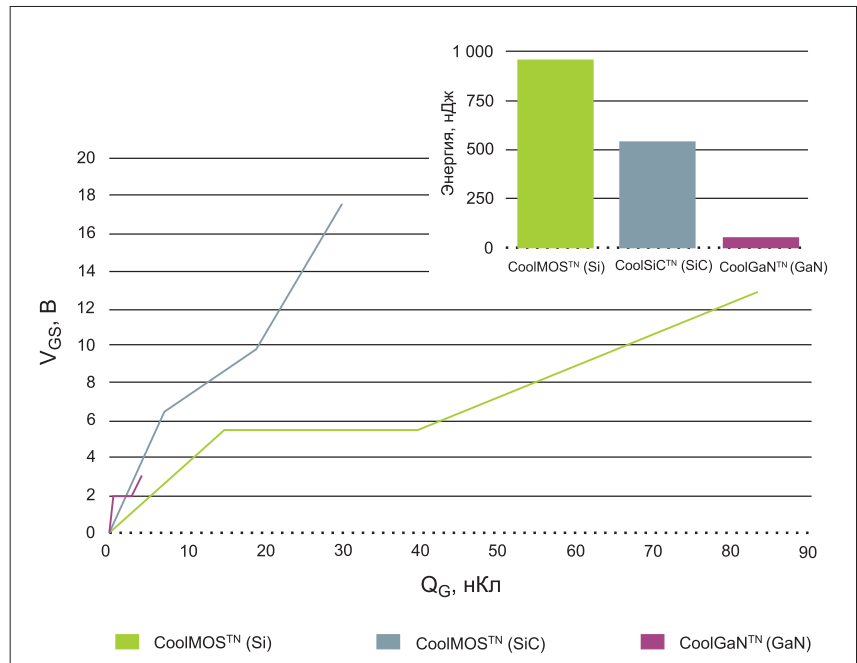


Рис. 3. Сравнение значений заряда затвора и управляющей мощности (см. вставку в правом верхнем углу) транзисторов Superjunction, SiC MOSFET и GaN HEMT (с потерями в RC-цепи и без них)

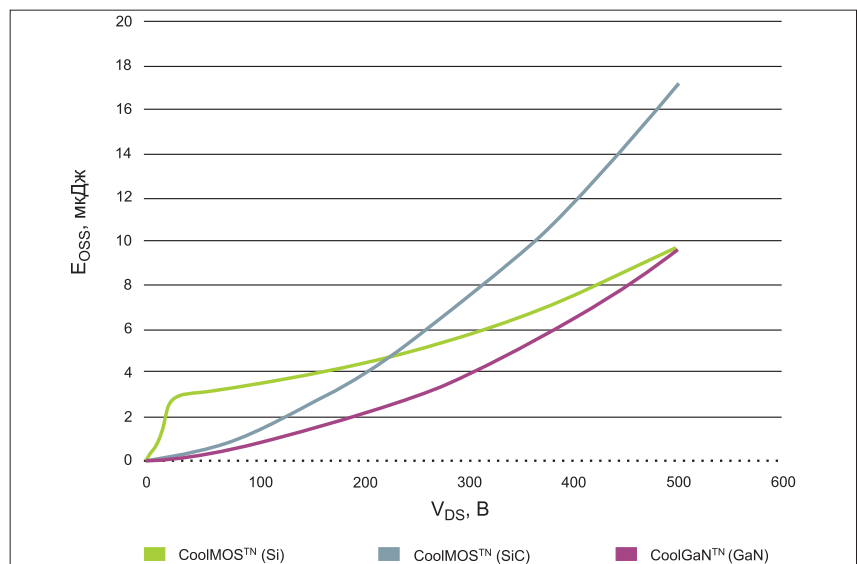


Рис. 4. Сравнение значений энергии E_{OSS} накопленной в выходном конденсаторе

трех рассматриваемых технологий. Электрическая характеристика полупроводникового устройства при коммутации, в первую очередь, определяется выходной емкостью. Благодаря малому значению выходной емкости в области высоких напряжений у транзисторов Superjunction и соответствующему очень малому уровню накопленной энергии E_{OSS} эти устройства хорошо подходят для приложений с жесткой коммутацией.

Поскольку выходная емкость этих транзисторов обладает большой нелинейностью, у них практически отсутствуют потери при выключении. Потери на переключение при жесткой коммутации можно уменьшить до величины, близкой к уровню энергии E_{OSS} , накопленной в выходном конденсаторе. Особенно востребованной на мировом рынке является комбинация транзисторов Superjunction с карбидокремниевыми диодами Шоттки в качестве

встроенного диода. Такое сочетание используется в схемах коррекции коэффициента мощности (ККМ) для модулей источников AC/DC-питания мощностью выше 75 Вт.

Как видно из рисунка 4, энергия E_{OSS} у транзисторов GaN HEMT достигает того же уровня, что и у Superjunction. Однако лидерами по этому показателю являются кремниевые транзисторы Superjunction следующего поколения, если их сравнивать с GaN. Следовательно, можно ожидать, что устройства Superjunction по-прежнему будут применяться, главным образом, в таких несимметричных технологиях как каскады ККМ.

Напротив, широкозонные полупроводники станут в полной мере востребованы в полумостовых топологиях, к которым относятся безмостовые схемы ККМ с тотемным выходным каскадом (totem pole). Преимущества технологий SiC и GaN также найдут самое

широкое применение в этих схемах (см. рис. 5). В таких приложениях следует учитывать, с одной стороны, величину заряда обратного восстановления Q_{RR} , а с другой заряд выходного конденсатора Q_{OSS} . Эти показатели у транзисторов GaN HEMT почти на порядок лучше, чем у кремниевых аналогов, и в два раза ниже, чем у SiC MOSFET.

Технология GaN обладает явными преимуществами по показателю Q_{RR} благодаря полному отсутствию накопленного заряда, что обусловлено отсутствием $p-n$ -перехода. Транзисторы GaN HEMT проводят в обратном направлении, как и горизонтальная КМОП-структура, как только напряжение стока становится меньше разности между приложенным напряжением затвора и пороговым напряжением. Хотя в транзисторах SiC MOSFET имеется внутренний диод, который инжектирует биполярный заряд в случае функционирования при обратной полярности, время жизни этих носителей настолько мало, что только минимальное количество заряда Q_{RR} попадает на выводы этих устройств даже при высокой частоте коммутации. На рисунке 6 показана зависимость Q_{OSS} от напряжения сток-исток при использовании рассматриваемых технологий.

ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДУЛЯ ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Сравним все рассматриваемые полупроводниковые технологии для построения упомянутой схемы ККМ. Топология с тотемным выходным каскадом лучше всего годится для широкозонных транзисторов. В ней один полумост с высокой коммутационной частотой (45–65 кГц) напрямую подключается к сети электропитания переменного тока через входной дроссель, а второй полумост, работающий как синхронный сетевой выпрямитель, соединяется с нейтралью. Если для модуляции используется трапециевидная характеристика тока (режим непрерывной проводимости), в полумосте на высокой частоте переключения происходит жесткая коммутация в каждом цикле переключения. В этих условиях эксплуатации у транзисторов SiC и GaN – самые большие преимущества по таким показателям как Q_{RR} и Q_{OSS} .

Благодаря меньшим значениям Q_{OSS} и полному отсутствию заряда обратного восстановления, у технологии GaN HEMT больше преимуществ по сравнению с SiC MOSFET: их КПД выше примерно на 0,1–0,3%. Обе технологии преодолевают барьер КПД в 99%, что существенно при использовании импульсных источников питания, суммарная эффективность которых должна превышать 98%. Эти полупроводники работают

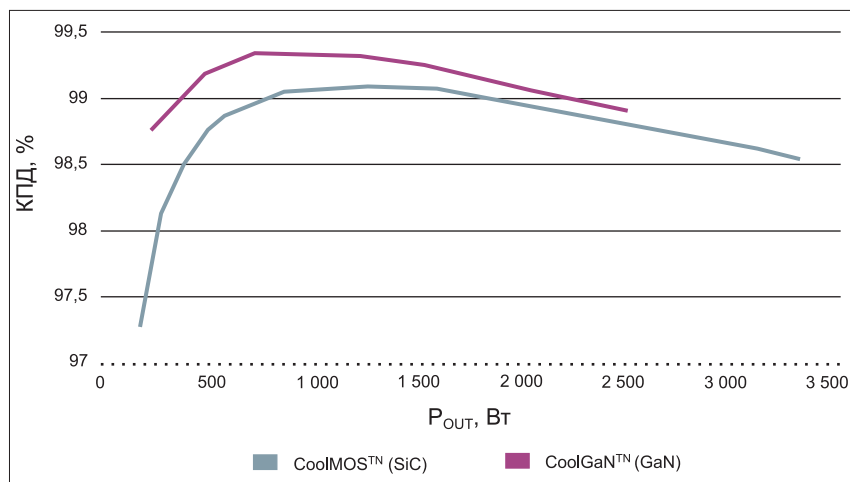


Рис. 5. КПД SiC MOSFET и GaN HEMT в топологии ККМ с каскадным выходным каскадом при использовании трапециевидной модуляции тока

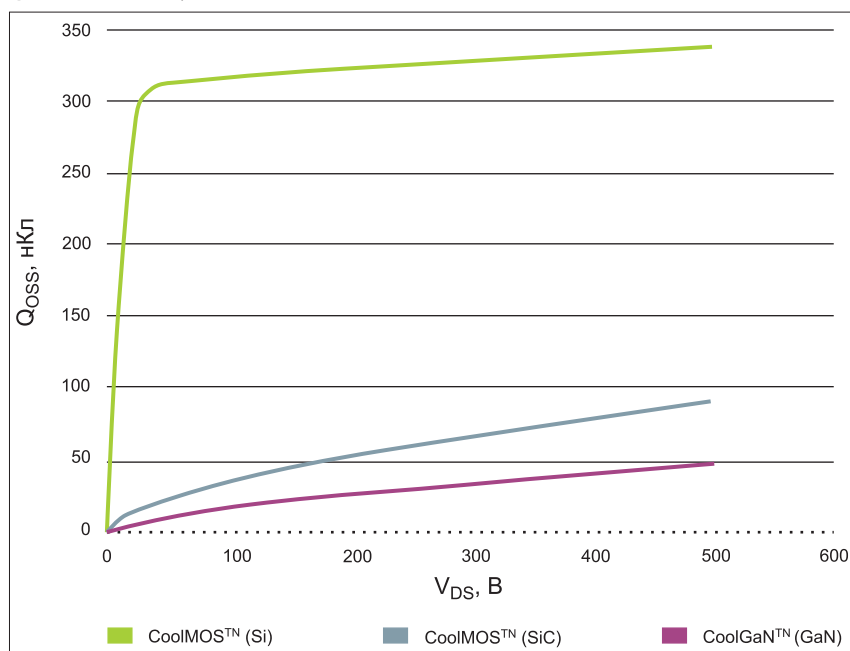


Рис. 6. Сравнение характеристик Q_{OSS} полупроводников Superjunction, SiC MOSFET и GaN HEMT

на двух разных испытательных установках. Рабочая частота SiC MOSFET составляет 45 кГц, а испытательная установка полупроводников GaN HEMT функционирует при 65 кГц. Входное напряжение переменного тока составляет 230 В.

Транзисторы Superjunction нельзя использовать в топологии с трапецевидной модуляцией тока из-за высоких потерь при обратном восстановлении. Альтернативный метод управления обеспечивает схема КKM с использованием тотемного выходного каскада и тока треугольной формы (ТСМ). Применение этого метода, совместимого с транзисторами Superjunction, дает КПД на уровне 99%. Однако его недостатком по сравнению с широкозонными транзисторами, работающими в синфазном режиме, является возросшая сложность управляющей схемы из-за изменения частоты коммутации при изменении тока нагрузки и входного переменного напряжения в широком диапазоне. Более того, необходимо точно определять пересечения током нулевых точек.

Устройства Superjunction, главным образом, востребованы в стандартных каскадах КKM, работающих в синфазном режиме с мостовым выпрямителем. Однако за последние несколько лет хорошо себя зарекомендовала полумостовая топология с двумя силовыми устройствами, соединенными встречно. В сочетании с двумя транзисторами Superjunction и двумя карбидкремниевыми диодами Шоттки эта топология обеспечивает пиковый КПД около 98,8%.

Выводы

Захватывающая гонка за право быть лидером в классе полупроводников 600/650 В еще не завершилась. У каждой из рассмотренных транзисторных технологий Superjunction, GaN HEMT и SiC MOSFET имеются свои сильные стороны. Чтобы остановиться на наиболее подходящем решении, необходимо хорошо понимать, насколько хорошо характеристики силовых полупроводников отвечают нуждам конкретного приложения. Компания Infineon Technologies поддерживает все полупроводниковые технологии, предлагая клиентам ассортимент изделий, специализированных по классам $R_{DS(on)}$ и типам корпусов. ➡