GaN и SiC НА ПУТИ К СКОРОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ

МАРДЖЕРИ КОННЕР, технический редактор, EDN Europe

Полупроводники с широкой запрещенной зоной, такие как GaN и SiC, дают начало новому поколению мощных ключевых устройств, которые переключаются быстрее и с меньшими потерями, чем почтенные кремниевые МОП-транзисторы, и позволяют строить более миниатюрные и эффективные источники питания.

Мощные кремниевые МОП-транзисторы приближаются к своему теоретическому пределу как по сопротивлению в открытом состоянии, так и по заряду затвора. Хотя увеличение усиления кремниевых ключей продолжится, прибавка будет происходить все реже и меньше. Но есть материалы с широкой запрещенной зоной, такие как SiC (карбид кремния) и GaN (нитрид галлия), которые уже несколько лет находят применение в ВЧ-усилителях. Успехи в технологиях производства приводят к снижению цен и улучшению мощностных характеристик ключей на основе этих материалов. Их сторонники утверждают, что они вытеснят кремниевые МОП-транзисторы в импульсных источниках питания, ключевыми показателями для которых являются плотность мощности и КПД.

Размер элементов источника питания определяет плотность мощности. Самыми крупными элементами являются индуктивности и конденсаторы, на третьем месте с большим отрывом идут МОП-транзисторы. Размеры конденсаторов и индуктивностей уменьшаются при увеличении рабочей частоты, однако для МОП-транзисторов существует предел. Потери при переключении, связанные с зарядом затвора, препятствуют дальнейшему увеличению частоты. Уменьшение размера кристалла МОП-транзисторов увеличивает сопротивление в открытом состоянии. Показатель производительности МОП-транзисторов традиционно описывается как произведение сопротивления открытого транзистора на заряд затвора. В кремниевых приборах улучшение одного параметра происходит за счет другого: уменьшение сопротивления обычно достигается увеличением площади транзистора, однако это приводит к увеличению заряда затвора и, следовательно, к увеличению емкости, что ухудшает динамические свойства силового ключа.

Сопротивление в открытом состоянии транзисторов на полупроводниках с широкой запрещенной зоной на порядок меньше, чем у кремниевых транзисторов, причем это не сопровождается увеличением заряда затвора. Однако работа с GaN и SiC на высоких мощностях отличается сложностью и дороговизной. Транзисторы на GaN и SiC на протяжении многих лет используются в ВЧ-усилителях, а SiC-диоды Шоттки обычно используют как выпрямители в высоковольтных мощных источниках питания, т.к. обратный ток утечки у них во много раз меньше, чем у кремниевых диодов. Кроме того, SiC имеет высокую теплопроводность, поэтому увеличение температуры не приводит к ухудшению скорости переключения. Приборы на SiC ориентированы на высоковольтные приложения, которым необходимы запирающие напряжения 1200…1700 В. При таких напряжениях чаще используют кремниевые биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), чем МОП-транзисторы, однако IGBT дороже, а разработчики меньше знакомы с их особенностями и ограничениями. Полевые транзисторы на SiC имеют во многом такие же характеристики включения, что и кремниевые МОП-транзисторы, например, они заперты в нормальном состоянии.

Компания **Cree** выпустила в 2011 г. мощные МОП-транзисторы серии SiC CMF2012SD по цене 93,75 долл. на момент выпуска. Они имеют запирающее напряжение 1200 В и максимальное сопротивление в открытом состоянии 110 мОм при токе стока 20 А и напряжении затвор-исток 20 В. При максимальной рабочей температуре 150°C сопротивление возрастает только на 20%. Во всем диапазоне напряжений заряд затвора не превышает 100 нКл, что упрощает требования к цепи управления затвором, а прямое падение напряжения не превышает 2 В при токе нагрузки 20 А, что уменьшает потери.

Компания Cree предлагает и выпрямители Z-Rec, родственное семейство мощных SiC-диодов, у которых практически нет обратного восстановления при напряжениях пробоя 600, 650 и 1200 В. Диоды имеют номинальные токи 1…20 А на 600 В; 4…10 А на 650 В; 5…20 А на 1200 В. Они также доступны в виде чипов с токами 10 и 25 А при 1700 В.

Компания **Rohm Semiconductor** анонсировала серию SiC-диодов Шоттки SCS1xxAGC, которые поддерживают низкое прямое падение напряжения в широком диапазоне рабочих температур. Например, 10-А диод SCS110AGC имеет прямое напряжение 1,5 В при 25°C и 1,6 В при 125°C. Благодаря малому типовому времени обратного восстановления 15 нс возможно высокоскоростное переключение, а также минимизируются потери переключения. Цены варьируются от 6,38 долл. за 6-А версию до 24,60 долл. за 20-А. Фирма Rohm в этом году дополнит свои SiC-диоды SiC-транзисторами. Она также планирует выпустить 600-В транзисторы и 1200-В SiC-транзисторы.

Компания **SemiSouth** изготавливает SiC-выпрямители на диодах Шоттки для солнечных инверторов и корректоров коэффициента мощности и предлагает мощный SiC JFET — включенный в нормальном состоянии 1200-В полевой транзистор с управляющим p-n-переходом SJEP120R085.

Цена SiC МОП-транзисторов, которая почти достигает 100 долл. может задвинуть эти транзисторы на нишевые рынки, но следует помнить, что, когда более 30 лет назад на свет появились кремниевые MOSFET, они стоили около 100 долл. (в ценах 1970 гг.), а сейчас продаются по цене несколько долл. за штуку. Джон Палмур, главный технолог фирмы Cree, ожидает, что стоимость SiC-устройств будет быстро снижаться за счет их технологичности и эффективности производства [1]. Однако вероятно и то, что они будут хорошо продаваться и по этой цене, потому что рынок может ее выдержать. Эффективность имеет свою цену, и более высокий КПД мощ-

ных источников питания более важен, чем их стоимость.

Нитрид-галлиевые устройства также добились успеха в применении в ВЧ-ключах, но, как правило, на более низких напряжениях, чем карбид-кремниевые. Производители выращивают GaN-устройства на сапфировых подложках, поэтому это производство является дорогостоящим. Прорыв случился, когда стало возможно выращивать GaN-структуры на кремнии. Первые устройства GaN на кремнии работали при напряжении меньше 100 В и использовались на рынках передачи данных и импульсных источников питания. Более высокая скорость переключения и КПД GaN позволяет создавать DC/DC-преобразователи, работающие в мегагерцевом диапазоне. При этом экономится площадь и мощность, уменьшается потребность в радиаторах.

Компания **International Rectifier** первой вывела на рынок силовые устройства GaN на кремнии, представив силовой модуль IP2010 в конце 2010 г. Устройство имеет запирающее напряжение 20…40 В и предназначено для POL DC/DC-преобразователей. Технология этой фирмы работает в обедненном режиме, в нормально включенном состоянии, однако это свойство спрятано от разработчиков, т.к. компания предлагает не дискретные компоненты, а законченные силовые модули. Например, вместо того, чтобы приводить данные о запирающем напряжении транзисторов, International Rectifier сообщает о GaNpowIR, что для входного напряжения 7…13,2 В выходное напряжение составляет 0,6…5,5 В, выходной ток 30 А, рабочая частота 3 МГц. Драйверы продаются по цене 9 долл.

Фирма **EPC** (Efficient Power Conversion) также предлагает GaN-устройства под торговой маркой eGaN (enhancement-mode GaN, «усиленный» GaN). Недавно компания представила транзистор EPC2010 с напряжением сток-исток 200 В, максимальным сопротивлением в открытом состоянии 25 мОм при 5 В на затворе и импульсным током 60 А. В отличие от импульсного GaN-модуля International Rectifier, EPC2010 — дискретный транзистор. Он подобен мощному кремниевому MOSFET, но имеет свои особенности применения. Например, из-за высокой частоты переключения eGaN-цепь чувствительна к разводке. Кроме того, устройство работает только в узком диапазоне напряжений затвора. Чтобы он открылся, требуется 4,5 В, а предельное значение составляет всего лишь 6 В. С учетом переходных процессов, которые можно ожидать в преобразователях напряжения, 1,5 В — очень

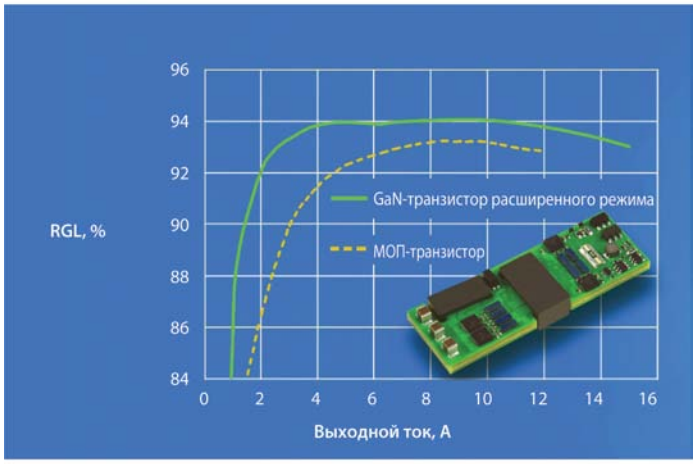

Рис. 1. **GaN-FET драйвер верхнего и нижнего уровней LM5113 компании National Semiconductor**

узкий рабочий диапазон. Поскольку порог еще ниже, затвор необходимо модулировать более жестко, чтобы, когда напряжение на нем приближается к напряжению «земли», оно оставалось ниже 1,4 В, а не 2 В, как в кремниевых MOSFET.

Как говорит Алекс Лидоу, основатель и генеральный директор EPC, «в транзисторах GaN на самом деле нет диода. Нет потерь на обратное восстановление, что улучшает характеристики. Но когда полевой транзистор остается во включенном состоянии, он все равно имеет прямое падение напряжения более 1,5 В, поэтому необходимо быть аккуратным со временем простоя. Ни один из этих недостатков не является непреодолимым, но каждый требует внимания».

Осознавая рыночные возможности, компания **National Semiconductor** недавно представила 100-В полумостовой драйвер затвора для использования с транзисторами eGaN в высоковольтных преобразователях (см. рис. 1). GaN-FET драйвер верхнего и нижнего уровня — LM5113 — регулирует плавающее напряжение бутстрепного конденсатора верхнего уровня примерно до 5,25 В для управления мощным eGaN-транзистором, не превышая максимального напряжения затвор-исток. Драйвер LM5113 имеет также независимые выходы стока и истока для плавного управления уровнем включения в зависимости от уровня выключения. Согласующая цепь с импедансом 0,5 Ом обеспечивает быстрый, надежный механизм выключения мощного eGaN-транзистора с низким порогом напряжения. Драйвер LM5113 также имеет бутстрепную цепь высокого уровня, что уменьшает площадь на печатной плате и предоставляет независимые логические входы для драйверов высокого и низкого уровней. При этом обеспечивается гибкость при использовании в разнообразных топологиях как изо-

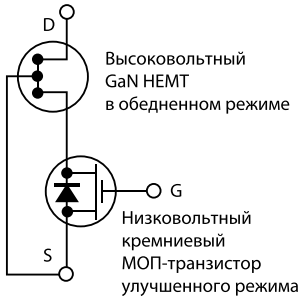

Рис. 2. **Схема драйвера затвора низковольтного кремниевого полевого транзистора, соединенного с высоковольтным GaN HEMT в каскадной конфигурации** (International Rectifier)

лированных, так и неизолированных источников питания.

Что касается будущих GaN-устройств, International Rectifier и EPC анонсировали продукты с запирающим напряжением сток-исток 600 В. Новый прибор фирмы International Rectifier (см. рис. 2) будет выведен из исходного GaN-преобразователя и станет продаваться как дискретный ключ, состоящий из низковольтного кремниевого полевого транзистора в каскадной конфигурации, последовательно соединенного с GaN HEMT (high-electron-mobility transistor, транзистор с высокой подвижностью электронов). «Это означает, — говорит Тим Макдональд, вице-президент по новым технологиям, — что вы получаете нормально выключенный режим трехвыводного устройства, которое выглядит и работает в точности как типичный кремниевый силовой транзистор. Вы можете управлять им при помощи стандартного драйвера затвора, не задаваясь вопросами ограничений напряжения, перенапряжения или надежности».

Компания **Transphorm** — производитель GaN-устройств в 2011 г. на конференции по прикладной силовой электронике (Applied Power Electronics Conference) заявила о том,

что планирует представить полнофункциональные 600-В устройства с сопротивлением в открытом состоянии 180 мОм. Компания использует как кремниевые, так и SiC-подложки для своих GaN-устройств, создавая ранние версии продуктов на SiC, кристаллическая структура которого ближе к GaN, и отлаживая процесс на SiC, прежде чем перевести его на кремний. Структура устройства будет похожа на структуру ключей International Rectifier, т.е. это будет каскадное последовательное соединение низковольтного кремниевого полевого транзистора с высоковольтным GaN HEMT [2].

«Мы изучили вопрос создания нормально-выключенного устройства на GaN и решили, что современное состояние конструкции GaN-затвора ограничивает максимальное положительное напряжение величиной 6 В, — говорит Карл Блейк, вице-президент Transphorm по маркетингу. — Мы смотрим на это ограничение как на серьезную проблему, которая затрудняет практическое использование высоковольтных GaN-устройств. Поэтому мы решили упаковывать по два кристалла в один корпус, используя проверенную кремниевую технологию в контроллере тока, а новую GaN-технологию — в улучшенном устройстве запирания напряжения». Такой подход позволяет разработчикам силовой техники использовать имеющиеся контроллеры и драйверы и фокусироваться на улучшении характеристик.

Фирма EPC также анонсировала 600-В eGaN-устройства. По словам Алекса Лидоу, для GaN-устройств нет фундаментальных ограничений на запирающее напряжение, GaN будет соперничать с SiC и будет дешевле в приложениях, где требуются хорошие динамические параметры. Использование GaN позволяет менять напряжение источника питания при работе на частоте 100 МГц: «Самая дорогая часть радиосистемы — это передатчик, и сейчас мы разгрузили его от неиспользуемой энергии (за счет изменения напряжения питания в соответствии с огибающей излучаемого сигнала), которая шла в тепло. Благодаря этому мы можем либо накачивать вдвое больше мощности, либо избавиться от части радиаторов».

В качестве потенциальных приложений А. Лидоу видит микроинверторы солнечных батарей. 250-Вт инверторы находят применение в домашнем хозяйстве, в бизнесе, конкурируя с 3-кВт центральными инверторами, которые сейчас более эффективны, чем маломощные низковольтные микроинверторы. Микроинверторы требуют одновременно высокой частоты, высокого напряжения и высокой мощности, что делает очень привлекательным использование GaN HEMT.

Многие представители промышленности считают, что рынок вторичных источников питания, основанных на новых компонентах, будет напоминать ранние стадии рынка кремниевых MOSFET, и многие компании ринутся на него со своими технологиями. Например, **Microsemi** планирует объединиться с EPC для разработки высоконадежной версии GaN HEMT.

ЛИТЕРАТУРА

1. Conner M. Emerging power technology: silicon carbide//EDN, Feb 17, 2011.

2. Conner M. Transphorm: GaN power devices prove their worth at higher voltages// EDN, July 25, 2011.

ИНЖЕНЕР-ИНЖЕНЕРУ

| НЕСКОЛЬКО ЗАМЕЧАНИЙ ПО ПРИМЕНЕНИЮ АЦП | На первый взгляд советы кажутся очевидными, но иногда не мешает вспомнить прописные истины.

Равенство фаз на входе АЦП

При дифференциальном входном сигнале важно, чтобы между обоими составляющими дифференциального сигнала сохранялся сдвиг фаз 180°. Иначе возникают искажения четных гармоник. Расхождение фаз на аналоговом входе, как правило, возникает в случае, если компонент не имеет достаточного допуска, либо топология печатной платы несимметрична.

При использовании трансформатора на входе АЦП может возникать пассивное расхождение фаз на частотах 100...150 МГц. Его можно уменьшить, если использовать два трансформатора или симметрирующих устройства. Однако при этом существенно увеличивается размер и стоимость схемы, поэтому это — не лучшее решение.

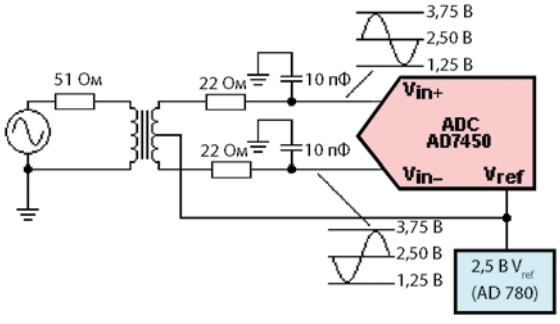

Рис. 1. Для приложений, требующих развязки по постоянному току, высокочастотный трансформатор может применяться в качестве преобразователя несимметричного сигнала в хорошо сбалансированный входной сигнал АЦП

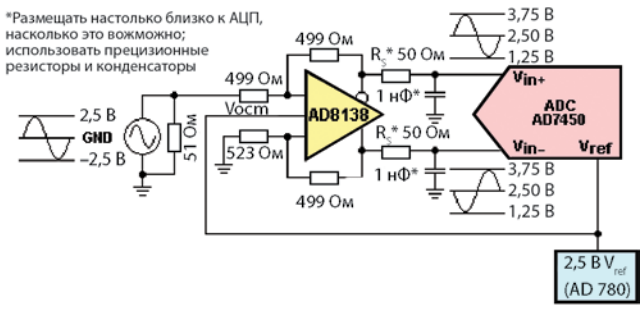

Рис. 2. Использование дифференциального усилителя позволяет преобразовать несимметричный входной сигнал в дифференциальный

Активное расхождение фаз, которое вносит усилитель на входе АЦП, обычно возникает в случае, когда допуски элементов слишком велики. Например, резисторы, устанавливающие коэффициент усиления, должны иметь допуск 1% или меньше. При возникновении сдвига фаз на суммирующих входах напряжение немного изменяется, что приводит к искажению второй гармоники. Сдвиг фаз может возникнуть из-за неправильной трассировки, когда сигналы проходят по ассиметричным путям с различной задержкой. Допустимый уровень расхождения фаз — не более 4°.

www.elcomdesign.ru