

# ОСНОВЫ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ: ИМПУЛЬСНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ

**Данная публикация продолжает тему, начатую в статье «Малоизвестные факты из жизни IGBT и MOSFET» [1] и посвященную особенностям работы наиболее распространенных в преобразовательной технике силовых ключей. В настоящей статье рассматриваются некоторые базовые вопросы, касающиеся импульсных режимов работы преобразователей.**

**Арендт Винтрих  
(Arendt Wintrich)**

**Ульрих Николаи  
(Ulrich Nicolai)**

**Вернер Турски  
(Werner Tursky)**

**Тобиас Райманн  
(Tobias Reimann)**

**Перевод и комментарии:  
Андрей Колпаков**

Andrey.Kolpakov@semikron.com

## Базовые режимы коммутации силовых ключей

За редким исключением, связанным с применением силовых транзисторов в «экзотических» устройствах (к которым относятся, например, линейные усилители звукового сигнала), MOSFET/IGBT предназначены для работы в импульсных режимах. В данной статье мы рассмотрим базовые схемы и основные рабочие состояния, применимые к подавляющему большинству электронных устройств класса «D». Основным преимуществом импульсного режима работы является низкий уровень потерь и высокое значение КПД, что особенно важно для преобразователей среднего и высокого диапазона мощностей.

Коммутация силового ключа в индуктивной цепи должна производиться активным способом в любой определенный момент времени. При бесконечно коротком времени переключения динамические потери мощности отсутствуют, и все напряжение падает непосредственно на индуктивности  $L$  коммутируемой цепи. В реальных схемах размыкание ключа, пропускающего ток  $I_S$ , невозможно без преобразования энергии, запасенной в индукторе. Преобразование не происходит только в том случае, когда  $I_S = 0$ . Такое состояние называется пассивным выключением, так как момент перехода через ноль зависит от характера протекания тока в конкретной цепи, а участвующий в нем транзистор является коммутатором нулевого тока ZCS (Zero Current Switch).

При нулевом напряжении ( $v_S = 0$ ) включение происходит в «идеальном» режиме без рассеяния мощности. Как и в предыдущем случае, оно является пассивным, поскольку форма напряжения на транзисторе определяется конкретной схемой, и оно принимает нулевое значение только в определенные моменты времени. Работающий таким образом ключ, соответственно, называется коммутатором нулевого напряжения ZVS (Zero Voltage Switch).

На рис. 1 показаны эюры токов и напряжений для базовых режимов коммутации, рассматриваемых в данной статье. Использование полупроводниковых элементов вносит в процесс переключения ряд существенных особенностей. Перед активным включением на транзисторе присутствует напряжение положительной полярности. Чтобы оно снизилось до минимального значения, ток управляемого ключа должен возрасти до величины, определяемой параметрами полупроводника и условиями нагрузки. Характеристика включения и индуктивность цепи коммутации ограничивают скорость нарастания тока и распределение напряжения между транзистором и индуктивностью, с увеличением которой потери на включение убывают.

При пассивном запирании ключа, проводящего в положительном направлении, ток падает до нулевой величины вследствие переплюсовки напряжения на внешней цепи. В результате этого он меняет полярность и начинает течь в обратном направлении за счет накопленных в зоне перехода носителей; это продолжается до тех пор, пока не восстановится блокирующая способность полупроводника. Данный процесс называется обратным восстановлением (reverse recovery).

На активно выключаемом транзисторе в первый момент образуется скачок напряжения в положительном направлении, величина которого определяется его динамическими характеристиками. Затем емкость, параллельная терминалам ключа (снаббер), может взять на себя часть тока, образующегося при запирании IGBT, потери мощности снижаются при увеличении емкости (так называемый «эффект снижения нагрузки»).

Полупроводник, блокируемый в пассивном режиме, перед включением находится под отрицательным напряжением. Если оно меняет полярность вследствие процессов, происходящих во внешней цепи, то силовой ключ будет проводить ток в положительном направлении; при его резком возрас-

тании это может привести к перенапряжению включения (прямое восстановление).

Базовые принципы работы силовых полупроводниковых приборов могут быть четко описаны в терминах активной и пассивной коммутации отдельных ключей (включение и выключение цепи между преобразующими энергией схемами), а также индуктивностей и емкостей (элементов, проводящих ток и находящихся под напряжением). На рис. 2 показаны основные соотношения между током и напряжением в различных режимах коммутации.

**Жесткое переключение (HS)**

При включении в «жестком» режиме (рис. 2, 5) почти все коммутационное напряжение  $v_K$  прикладывается к токонесящему ключу  $S_1$ , что создает высокий уровень потерь мощности. Индуктивность цепи  $L_K$  имеет минимальное значение, поэтому ток в полупроводниковом элементе нарастает очень быстро. Процесс токовой коммутации заканчивается пассивным выключением  $S_2$ .

При «жестком» выключении напряжение на  $S_1$  увеличивается до уровня, превышающего  $v_K$ . При этом ток  $i_{S1}$  практически не уменьшается, его спад начинается спустя некоторое время вследствие пассивного включения  $S_2$ . Емкость коммутационной цепи  $C_K$  очень мала, поэтому рост напряжения определяется, в основном, свойствами силового

полупроводника. Как и в предыдущем случае, «жесткое» запираение сопровождается очень высокими потерями мощности.

**Мягкое переключение (ZCS, ZVS)**

В процессе «мягкого» включения (рис. 2, 6 и 7) при нулевом токе (ZCS;  $S_1$  активно включен) коммутационное напряжение падает до уровня насыщения достаточно быстро, что обеспечивается выбором соответствующего значения  $L_K$ . При этом динамические потери мощности на полупроводниковом ключе отсутствуют или очень малы. Скорость нарастания тока определяется величиной  $L_K$ , процесс заканчивается при пассивном запираении  $S_2$ . В данном случае, в отличие от предыдущих, период коммутации  $t_K$  больше, чем время переключения отдельных ключей.

Активное блокирование  $S_1$  инициирует процесс плавного выключения транзистора ZVS. Уменьшающийся коммутационный ток переходит в конденсатор  $C_K$ , установленный параллельно силовому ключу. Величина  $C_K$  определяет процесс нарастания напряжения в зависимости от коммутируемого тока, динамические потери снижаются при затягивании фронта напряжения на силовом транзисторе.

**Резонансное переключение (ZCRS, ZVRS)**

При резонансной коммутации (рис. 2, 8 и 9) транзистор ZCS включается в момент

времени, когда ток  $i_L$  «виртуально» падает до нулевого значения. Потери мощности в этом случае оказываются даже ниже, чем в «мягком» режиме. Силовой ключ не может активно контролировать время перехода тока через нулевое значение, что отчасти ограничивает «управляемость» системы. Резонансное выключение транзистора ZVS происходит при падении коммутационного напряжения до нуля. Динамические потери при этом также ниже, чем при «мягком» выключении, но, как и в предыдущем случае, управляемость системы оказывается несколько хуже.

**Нейтральное переключение (NS)**

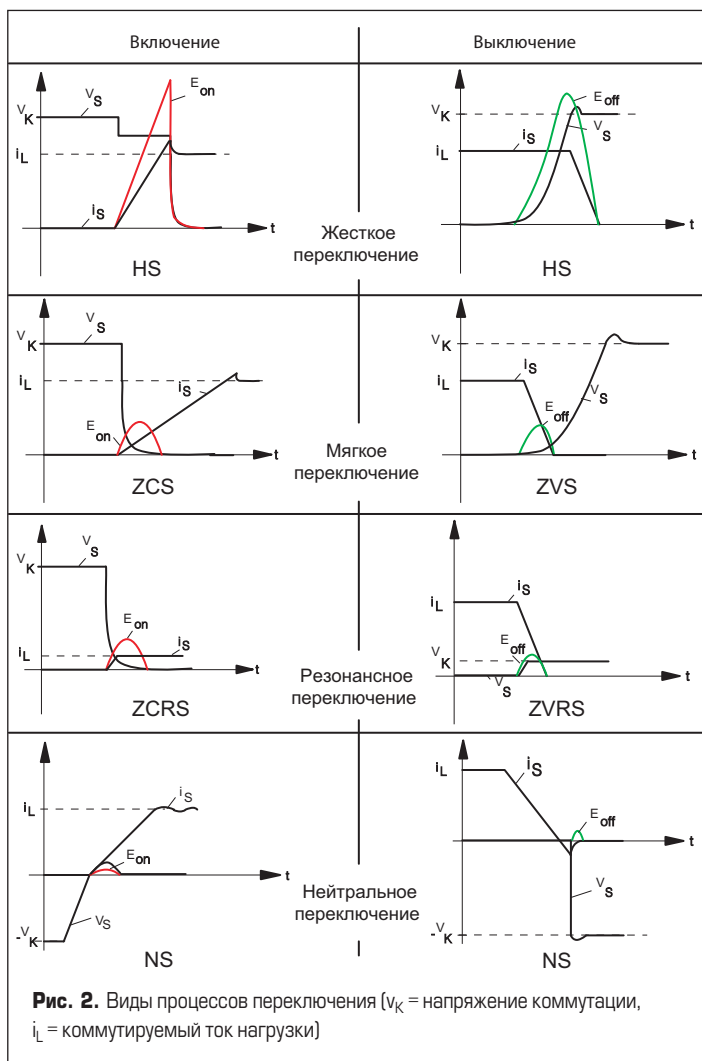
Нейтральная коммутация (рис. 2 и 10) происходит в случае, когда оба ключа (тока и напряжения) находятся в нулевом состоянии. Как правило, такая ситуация наблюдается в пассивных диодных выпрямителях.

**Электронные силовые ключи**

Понятие «силового электронного ключа» может относиться как непосредственно к полупроводниковому компоненту (MOSFET, IGBT, диоды), так и к интеллектуальной системе, содержащей силовую секцию и активное устройство управления. В последнем случае параметры ключа определяются как свойствами полупроводника, так и характеристиками драйвера.

Процесс коммутации	Форма сигнала	Эквивалентная схема
Активное включение $\frac{di_S}{dt} > 0 ; \frac{dV_S}{dt} < 0$		
Пассивное выключение $\frac{di_S}{dt} < 0 ; \frac{dV_S}{dt} < 0$		
Активное выключение $\frac{di_S}{dt} < 0 ; \frac{dV_S}{dt} > 0$		
Пассивное включение $\frac{di_S}{dt} > 0 ; \frac{dV_S}{dt} > 0$		

**Рис. 1.** Базовые режимы коммутации



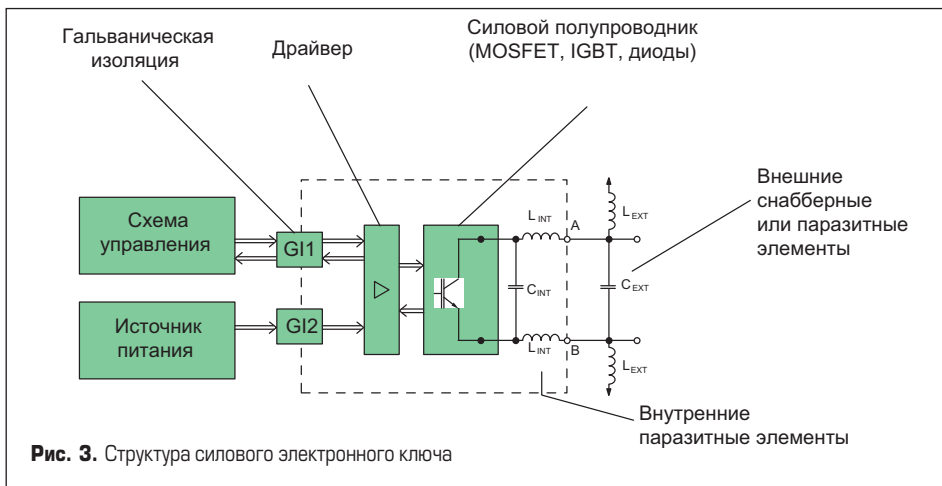


Рис. 3. Структура силового электронного ключа

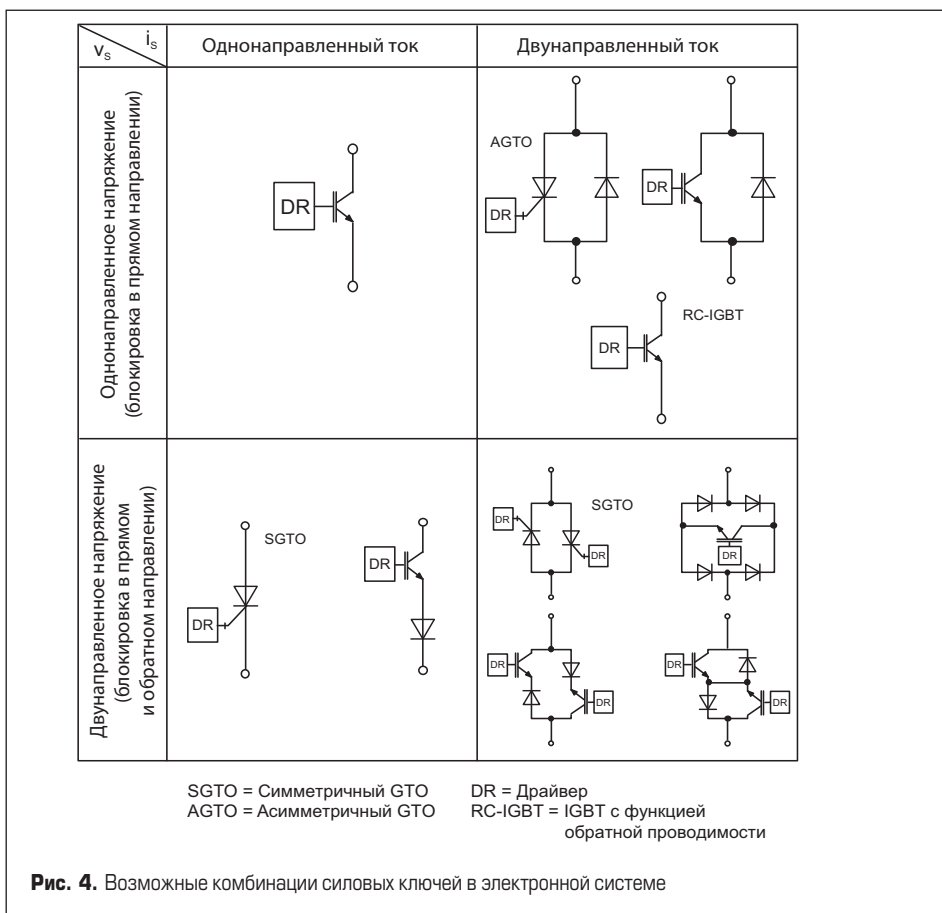


Рис. 4. Возможные комбинации силовых ключей в электронной системе

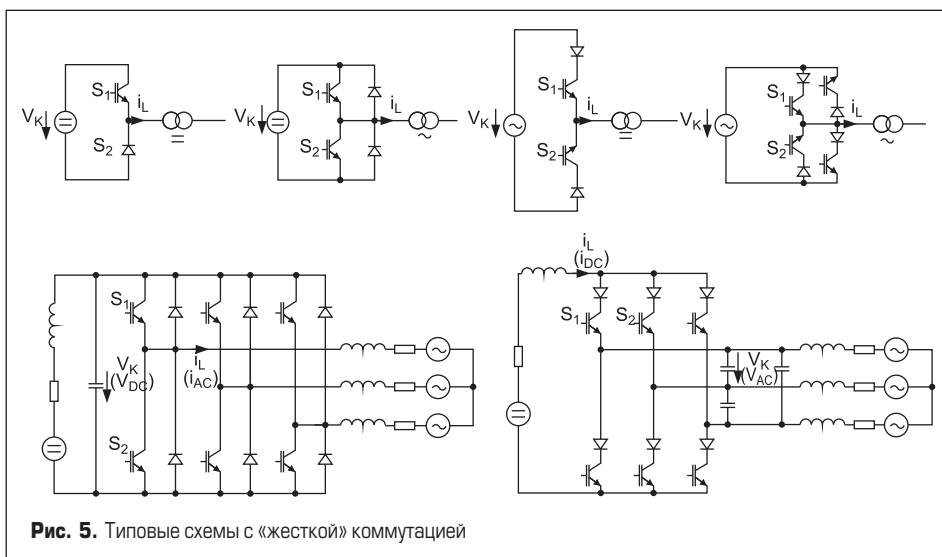


Рис. 5. Типовые схемы с «жесткой» коммутацией

На рис. 3 показана электронная система, содержащая интерфейс для подключения внешних высоковольтных цепей, низковольтной схемы управления (контроллера) и источника питания. Для развязки низковольтных и высоковольтных каскадов, как правило, используются оптическая или трансформаторная гальваническая изоляция. Возможные комбинации силовых ключей, работающих при различной полярности тока и напряжения, представлены на рис. 4.

Параметры полупроводникового ключа должны быть адаптированы для конкретного применения за счет выбора вида и технологии производства силовых кристаллов. Доминирующие характеристики электронной системы во многом определяются свойствами и структурой полупроводниковых элементов, соответственно силовые ключи подразделяются на несколько базовых видов. Выбор типа полупроводника определяется требованиями к конкретной схеме, способом переключения, полярностью напряжения и тока в коммутируемой цепи.

**Жесткое переключение (HS)**

Для идеальной схемы с чисто активной нагрузкой может быть использован ключ с жесткой характеристикой включения и выключения. При этом в коммутационной цепи могут находиться запасавшие энергию пассивные элементы минимальной величины ( $C_{Kmin}$ ,  $L_{Kmin}$ ) в комбинации с силовыми полупроводниками, работающими в режиме NS.

По сравнению с неуправляемым состоянием нейтральной коммутации жесткое переключение может контролироваться в точке включения и выключения. Это дает возможность управления системой за счет широтно-импульсной модуляции (ШИМ), наиболее широко используемой в практических применениях.

На рис. 5 показаны основные конфигурации устройств с IGBT-транзисторами, работающими в режиме HS при ШИМ-управлении. На практике чаще всего используются трехфазные инверторы напряжения (VSI) и тока (CSI). В симметричных схемах только один ключ переменного тока активно работает в режиме коммутации по обоим фронтам, другой при этом переключается нейтральным способом.

**Коммутация с нулевым током (ZCS)**

В режиме ZCS силовой полупроводник всегда включается активно, а выключается пассивно ( $i_s = 0$ ). Допуская некоторое ухудшение управляемости по сравнению с жесткой коммутацией, активное переключение здесь осуществляется с меньшими потерями мощности за счет достаточно высокой последовательной индуктивности  $L_K$ . Это делает возможной работу на больших частотах переключения, чем в режиме HS.

Единственным возможным способом управления в данном случае является PSM (Pulse Shift Modulation) — модуляция за счет сдвига импульса. В конкретных устройствах с ZCS-ключами он известен как метод «контроля фазового угла». На рис. 6 показаны возможные конфигурации ZCS-схем с эк-

вивалентными коммутационными цепями на основе IGBT. Они также могут быть использованы в устройствах с циклическим переключением, примером которых является параллельный резонансный конвертер с форсированным током. Сопротивление  $R_{load}$  определяет активную составляющую нагрузки, включенную параллельно резонансной цепи. К схемам, работающим исключительно на основе ZCS-ключей, относятся тиристорные выпрямители.

**Коммутация с нулевым напряжением (ZVS)**

Ключи с коммутацией при нулевом напряжении (ZVS) разрабатываются исходя из возможности активного выключения и пассивного включения при спаде напряжения до нуля ( $v_S = 0$ ). Активное запираение с малыми потерями достигается благодаря установке параллельно ключу достаточно высокой емкости. По сравнению с режимом HS снижение потерь здесь обеспечивается только при одном способе управления, как и в предыдущем случае: это PSM. Меньший уровень рассеиваемой мощности, однако, позволяет работать на более высоких частотах, чем при «жестком» переключении. На рис. 7 показаны варианты ZVS-конфигураций с IGBT и эквивалентные схемы. Они также могут быть использованы в устройствах с циклическим переключением, примером которых является параллельный резонансный конвертер с форсированным напряжением. Сопротивление  $R_{load}$  определяет активную составляющую нагрузки, включенную последовательно резонансной цепи.

**Резонансная схема с коммутацией при нулевом токе (ZCRS)**

Ключи в схеме ZCRS управляются таким образом, чтобы активное отпирание начиналось точно в тот момент, когда ток  $i_L$  переходит через нулевой уровень, т. е. без токовой коммутации. Следовательно, даже при минимальном уровне индуктивности  $L_K$  потери включения оказываются ниже, чем в случае ZCS, и они обусловлены изменением заряда емкости перехода полупроводникового ключа. В то же время дальнейшее снижение потерь, по сравнению с режимом ZCS, означает еще большее ухудшение управляемости, поскольку неконтролируемый момент времени включения определяется нулевым переходом тока, задаваемым, в свою очередь, внешней схемой. В устройствах с ZCRS возможен только косвенный контроль потоком энергии, который осуществляется открыванием и блокировкой ключей в течение нескольких периодов переменного тока. Такой метод называется PDM (Pulse Density Modulation) — модуляция плотности (или пачки) импульсов.

На рис. 8 показана коммутационная цепь ZCRS и пример схемы на IGBT. Для идеального случая переключения при нулевом переменном токе транзисторам не требуются антипараллельные диоды, однако в практических схемах они всегда устанавливаются для замыкания тока при ошибках в выборе момента коммутации.

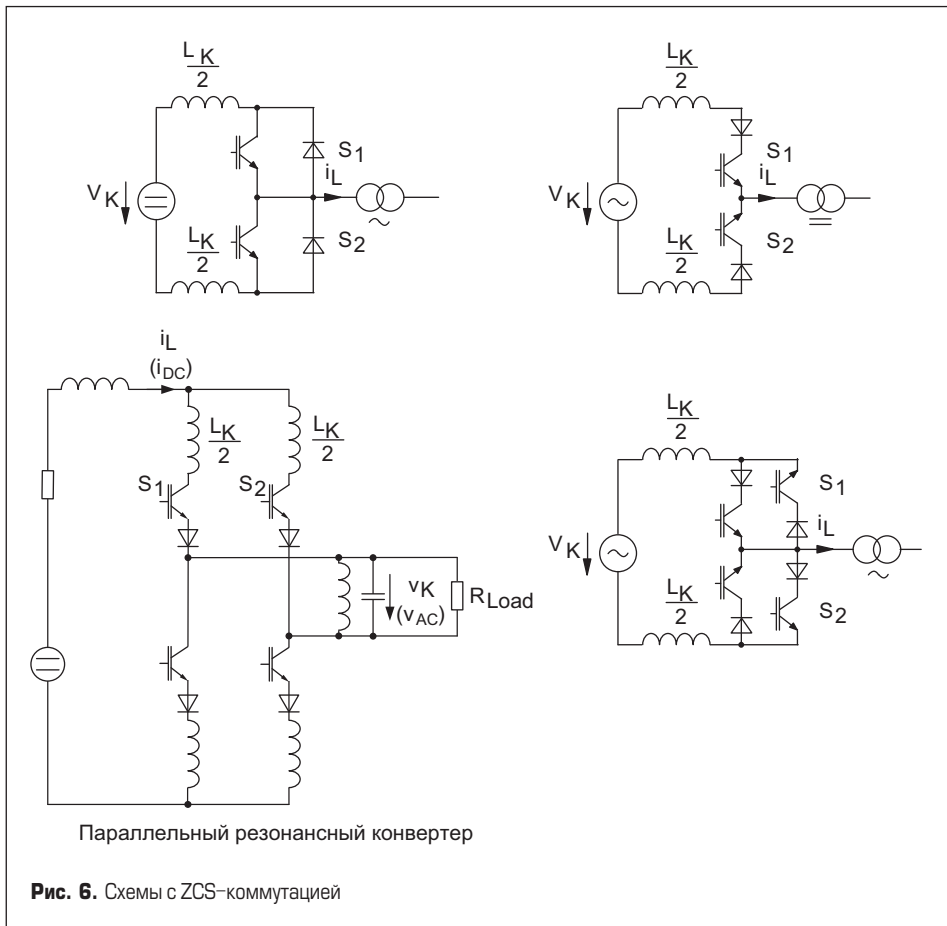


Рис. 6. Схемы с ZCS-коммутацией

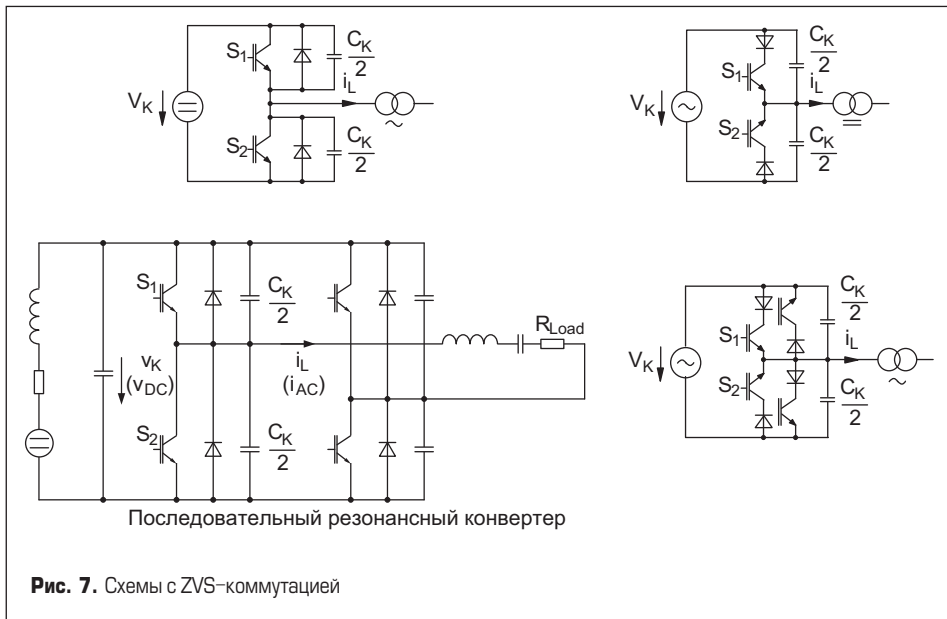


Рис. 7. Схемы с ZVS-коммутацией

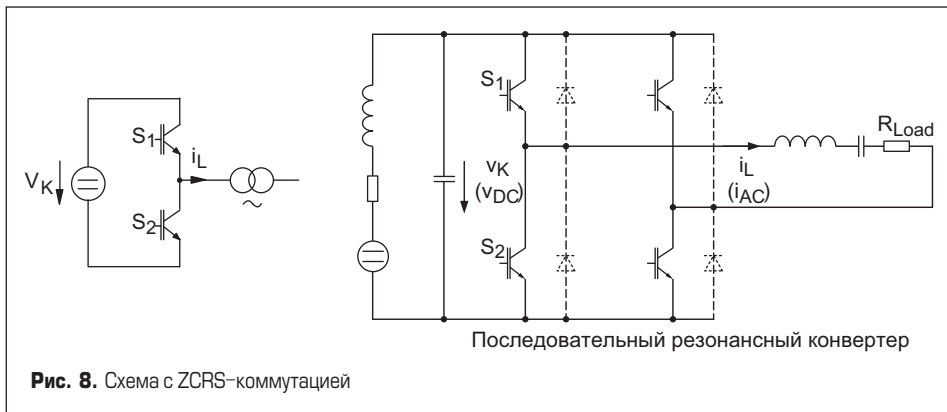


Рис. 8. Схема с ZCRS-коммутацией

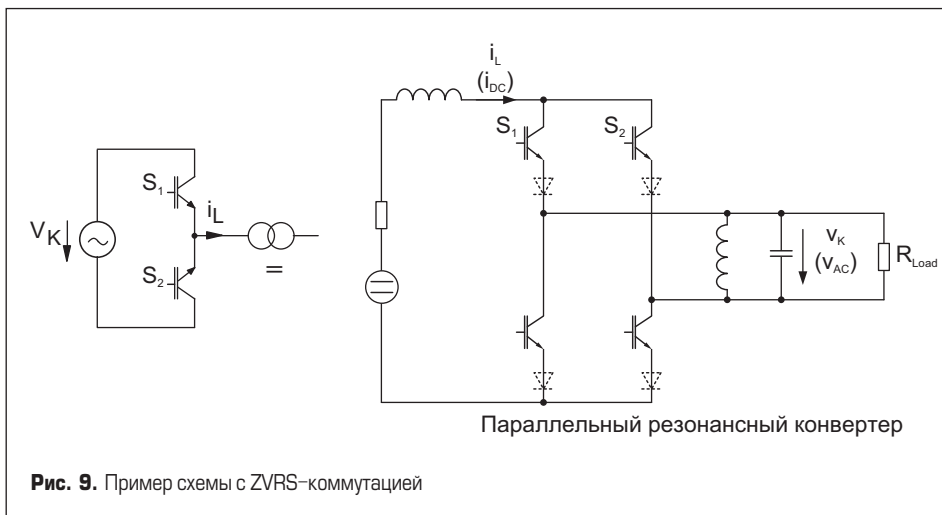


Рис. 9. Пример схемы с ZVRS-коммутацией

**Резонансная схема с коммутацией при нулевом напряжении (ZVRS)**

Базовым типом ключа для этого случая служит предельный вариант ZVS. Если он активно запирается точно в момент перехода переменного сигнала  $V_K$  через нулевой уровень, то нарастающее на транзисторе напряжение будет запускать процесс токовой коммутации (между ключами). Даже при очень низкой величине емкости  $C_K$  потери переключения будут ниже, чем в случае ZVS. При этом

управляемость, как и в предыдущем случае, ухудшается, поскольку время выключения не может регулироваться независимо, оно определяется моментом перехода через ноль, зависящим от внешней схемы. Подобно режиму ZCRS, в схемах с ZVRS возможно только косвенное управление потоком энергии, осуществляемое открыванием и блокировкой ключей на несколько периодов переменного тока (PDM). Коммутационная цепь ZVRS и пример схемы с IGBT приведены на рис. 9.

Таблица 1. Базовые типы силовых электронных ключей

Off	On	Жесткий	Мягкий ( $L_K$ последовательно)	Резонансный, $i_L = 0$	Нейтральный, $v_s = 0$
Жесткий	HS	HS	MZCS		ZVHS
Мягкий ( $C_K$ параллельно)	MZVS	MZVS			ZVS
Резонансный, $V_K = 0$					ZVRS
Нейтральный, $i_s = 0$	ZCHS	ZCHS	ZCS	ZCRS	NS

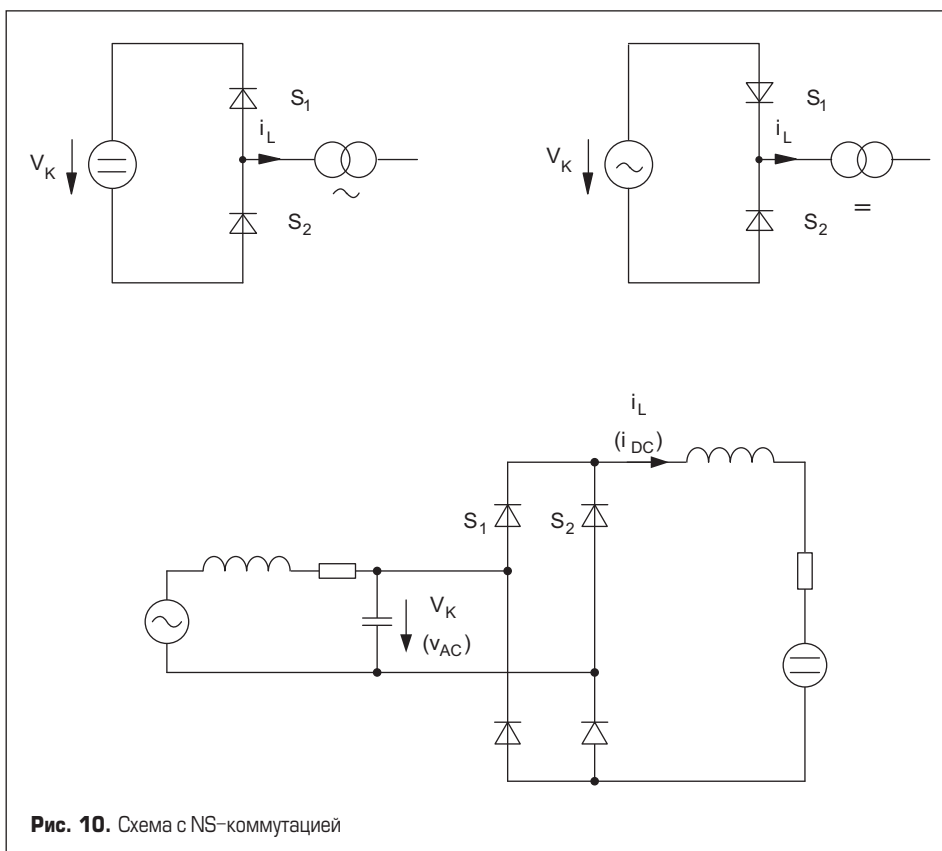


Рис. 10. Схема с NS-коммутацией

**Нейтральная коммутация (NS)**

Процесс коммутации в этом режиме начинается или заканчивается при нейтральном открывании или запираении нейтрального ключа, при этом ток и напряжение имеют нулевое значение. Такими свойствами по своей природе обладают полупроводниковые диоды. Режим NS также может быть реализован за счет применения активных ключей (например, IGBT), обеспечивающих «диодные» свойства за счет интеллектуального управления.

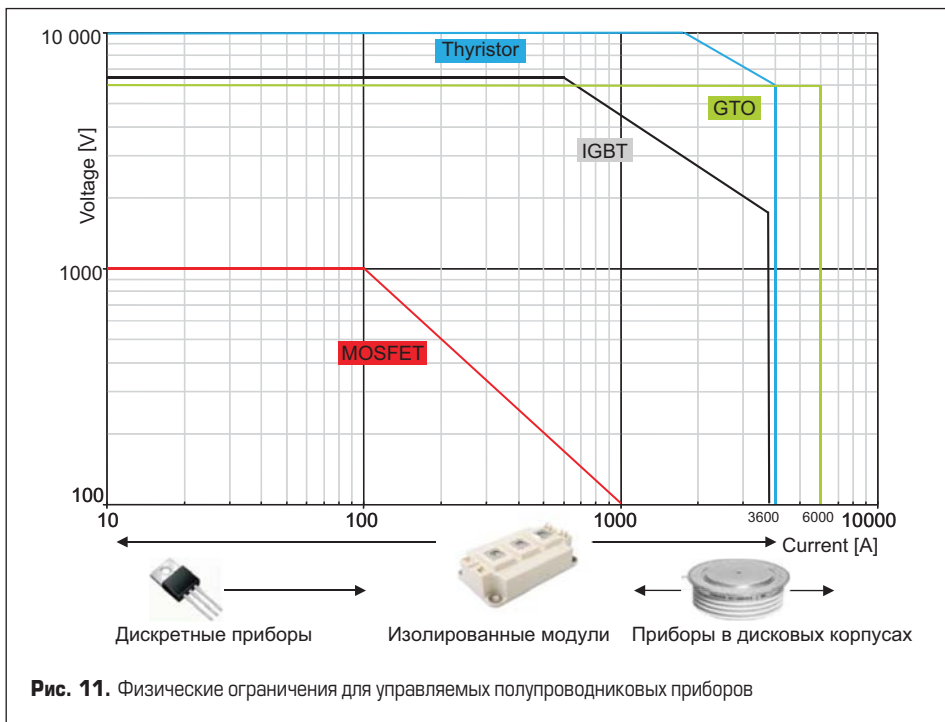
На рис. 10 показаны цепи коммутации и пример схемы NS с диодным выпрямителем, в таблице 1 дана сводная информация по базовым типам электронных ключей и режимов коммутации. Пустые поля соответствуют модификациям, используемым почти во всех практических применениях. Если условия возникновения резонанса в схеме, работающей с «мягкой» или резонансной коммутацией, не выполняются в каких-либо рабочих точках, то электронные ключи для обеспечения надежности должны быть способны работать в режиме HS. Указанным состояниям соответствуют специальные состояния: MZVS = модифицированный ZVS, MZCS = модифицированный ZCS. Как правило, транзисторы работают в таких условиях очень непродолжительное время. В случае активного «жесткого» запираения ZVS или активного «жесткого» отпираания ZCS, ключи функционируют как ZVHS или ZCHS соответственно.

**Области применения и предельные возможности силовых полупроводниковых ключей**

Развитие полупроводниковых технологий позволяет силовой электронике все шире вторгаться во все отрасли современной промышленности. Возрастающие требования по энергосбережению, рост популярности возобновляемых источников энергии, а также развитие электрического и гибридного тягового привода заставляет производителей элементной базы сфокусироваться на дальнейшем совершенствовании полупроводниковых ключей и росте их удельной мощности.

Ход этого процесса в значительной степени зависит от соотношения между стоимостью системы и степенью проникновения на рынок, а также уровнем потребления необходимой для производства энергии и потенциалом ее сбережения в процессе эксплуатации. В дополнение к основным задачам необходимо решать проблемы экономии материалов, снижения цены и повышения эффективности преобразования, которые становятся все более важными.

На рис. 11 показаны максимально достижимые на сегодня уровни токов и напряжений для управляемых полупроводников. Для расширения этих пределов используется последовательное и параллельное соединение как самих электронных ключей, так и готовых преобразователей, что открывает почти безграничные возможности генерации и преобразования энергии.



На рис. 12а приведены диапазоны рабочих частот для различных типов полупроводников, а на рис. 12б — основные области их применения и соответствующие диапазоны токов. Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) являются на сегодня наиболее популярными на массовом рынке преобразователей в диапазоне мощностей от единиц киловатт до нескольких мегаватт.

С середины 80-х годов началось активное использование силовых ключей новых поколений: MOSFET/IGBT, GTO (тиристор, выключаемый по затвору) и IGCT (тиристор с интегрированным затвором), заменивших традиционные тиристоры во всех применениях кроме коммутации сетевого напряжения.

Ключи с изолированным затвором IGBT и MOSFET имеют ряд эксплуатационных преимуществ, к которым в первую очередь относится активное запыление в режиме КЗ, возможность работы без снабберов, простое управление при очень низком токе затвора, высокая рабочая частота при относительно низком

уровне динамических потерь. При производстве этих полупроводниковых приборов используются хорошо отработанные и недорогие технологии микроэлектроники. Наиболее важными применениями для MOSFET являются источники питания, низковольтные преобразователи для автоэлектроники и устройства с очень высокой частотой коммутации (50–500 кГц).

Наиболее распространенные на сегодня силовые модули с током порядка десятков и сотен ампер размещаются в корпусах с потенциальной изоляцией. Первые коммерческие изолированные диодно-тиристорные модули были выпущены на рынок компанией SEMIKRON в 1975 г. Как правило, такие компоненты содержат несколько кремниевых чипов (тиристоры, диоды, IGBT), соединенных в определенной конфигурации. В состав модуля также могут входить датчики, схема управления и защиты, в этом случае он носит название «интеллектуальный», или IPM (Intellectual Power Module).

Несмотря на проблемы, связанные с односторонним отводом тепла, изолированные мо-

дули имеют гораздо более высокую популярность, чем ключи в дисковых корпусах, которые способны рассеивать на 30% больше энергии благодаря возможности охлаждения с двух сторон. Основная причина этого состоит в первую очередь в наличии потенциальной изоляции силовых кристаллов и радиатора. Конструктив изолированного модуля позволяет объединять множество различных компонентов, кроме того, они дешевле при серийном производстве.

Основные требования и направления развития силовой электроники могут быть сформулированы следующим образом:

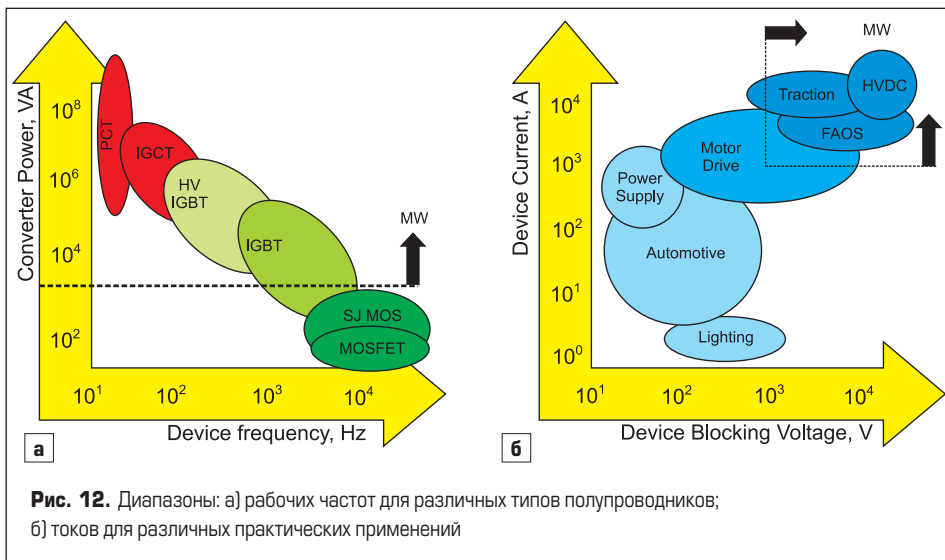
- расширение предельных режимов коммутации тока и напряжения;
- снижение уровня динамических потерь в силовых ключах и драйверах;
- расширение диапазона рабочих температур;
- повышение надежности, улучшение стойкости компонентов в аварийных режимах, увеличение срока службы;
- снижение цены.

Решение этих вопросов неотделимо от процесса совершенствования технологий полупроводниковых кристаллов:

- внедрение новых полупроводниковых материалов и структур кристаллов (в том числе широкозонных SiC, GaN);
- уменьшение площади чипов, повышение рабочей температуры или плотности тока;
- использование тонкопленочных кристаллов;
- повышение уровня интеграции чипов (резисторы затворов, измерение температуры);
- внедрение новых монокристаллических комбинированных структур (RC-IGBT, ESBT);
- повышение температурной и временной стабильности характеристик кристаллов;
- ... и методов корпусирования:
- повышение стойкости к активному и пассивному термоциклированию;
- повышение эффективности отвода тепла (изолирующие подложки, базовые платы, радиаторы);
- снижение величины внутренних паразитных элементов модулей за счет оптимизации промежуточных соединений;
- оптимизация конструкции силовых ключей с целью упрощения внешних соединений и уменьшения индуктивности DC-шины;
- уменьшение стоимости и улучшение экологических характеристик на этапе производства, эксплуатации и утилизации;
- повышение степени интеграции силовых модулей, разработка более функционально насыщенных IPM и законченных силовых систем.

Уровни интеграции силовых модулей представлены на рис. 13.

Применение передовых технологий изготовления и прецизионных методов контроля, уменьшение размеров полупроводниковых структур привели к тому, что свойства современных силовых полупроводниковых приборов подошли к пределам, обусловленным физическими свойствами кремния. Это является причиной поиска альтернативных полупроводниковых матери-



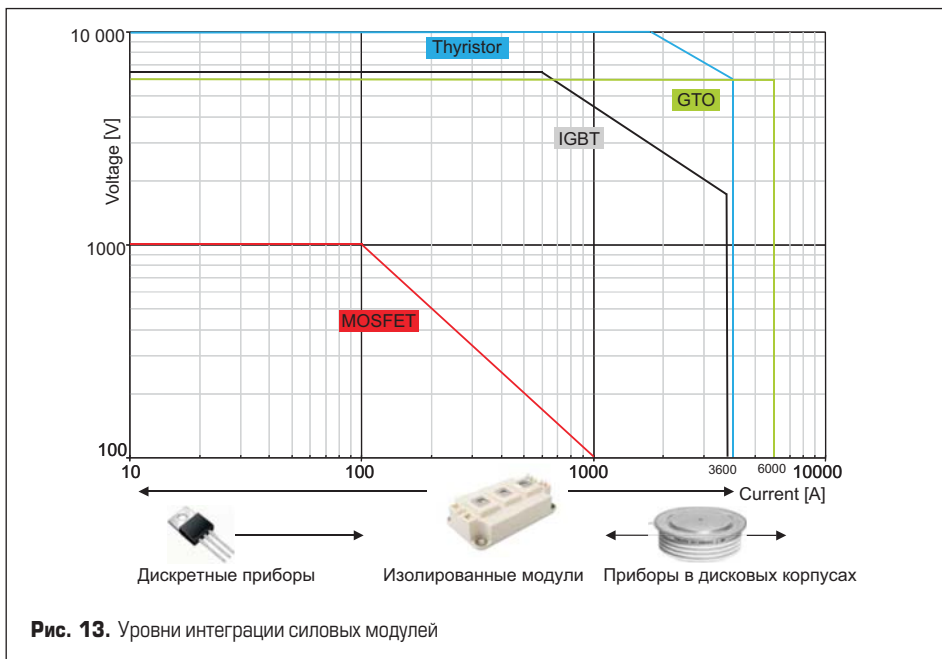


Рис. 13. Уровни интеграции силовых модулей

лов, который ведется с начала 50-х годов и особенно активизировался в последнее время.

Внимание производителей силовых полупроводников в первую очередь сосредоточено на двух материалах с расширенной запрещенной зоной — карбиде кремния (SiC) и нитриде галлия (GaN). По сравнению с кремнием, они имеют гораздо больший «энергетический зазор» между валентностью и зоной проводимости, что позволяет снизить потери проводимости и переключения, расширить температурный диапазон и улучшить теплоотдачу. Таблица 2 содержит количественные характеристики базовых материалов [2] для производства силовых чипов, а на рис. 14 показано их влияние на физические свойства полупроводников.

Ключом к более широкому применению SiC является поиск экономически эффективной технологии производства монокристаллических кристаллов, качество которых позволит устранить процесс деградации и которые будут доступны на пластинах с размерами, оптимальными для силовой электроники. В то время как кремний производится на 8-дюймовых «условно бездефектных» пластинах (не более 10% поврежденных чипов) по удельной цене 0,1 €/см<sup>2</sup>, плотность дефектов и, соответственно, стоимость пластин SiC диаметром всего 4” пока что примерно на порядок выше. Однако популярность карбид-кремниевых диодов Шоттки и полевых транзисторов неуклонно растет благодаря их уникальным характеристикам, в частности отсутствию заряда обратного восстановления.

Таблица 2. Сравнение свойств материалов полупроводниковых кристаллов

Параметр	Si	4H-SiC	GaN
Энергия запрещенной зоны E <sub>g</sub> , eV	1,12	3,26	3,39
Плотность структуры n <sub>r</sub> , см <sup>-3</sup>	1,4×10 <sup>-10</sup>	8,2×10 <sup>-9</sup>	1,9×10 <sup>-10</sup>
Пробивная напряженность поля E <sub>b</sub> , МВ/см	0,23	2,2	3,3
Подвижность электронов μ <sub>n</sub> , см <sup>2</sup> /В·с	1400	950	1500
Дрейфовая скорость v <sub>sat</sub> , см/с	10 <sup>7</sup>	2,7×10 <sup>7</sup>	2,5×10 <sup>7</sup>
Диэлектрическая постоянная ε <sub>r</sub>	11,8	9,7	9,0
Теплопроводность λ, Вт/см/К	1,5	3,8	1,3

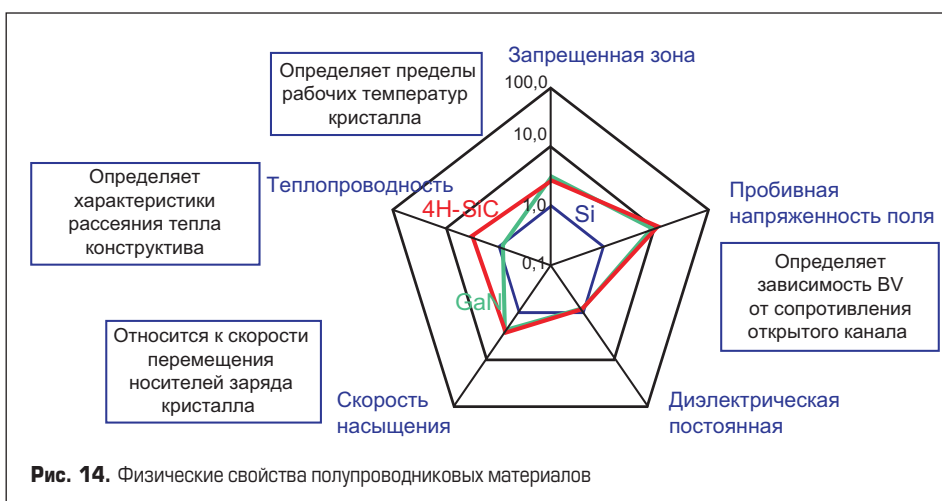


Рис. 14. Физические свойства полупроводниковых материалов

Нитрид галлия, обладающий несколько худшими характеристиками, чем карбид кремния, пока что большей частью используется в оптоэлектронике. В качестве материала подложки для GaN в настоящее время применяется не проводящий ток сапфир, поэтому компоненты из нитрида галлия должны иметь планарную структуру.

Поскольку разработка и совершенствование кремниевых полупроводниковых приборов по-прежнему находится в активной стадии, нет технической необходимости использовать другие материалы для MOSFET/IGBT с рабочим напряжением до 1000 В. В этом диапазоне напряжений полупроводники с широкой запрещенной зоной наиболее конкурентоспособны при производстве элементов со встроенным затвором, таких как JFET, биполярные транзисторы и тиристоры. С другой стороны, MOS-структуры однозначно переигрывают кремниевые компоненты на более высоких напряжениях.

Из-за высокой стоимости силовые полупроводники на основе широкозонных материалов используются в первую очередь в приложениях, где требуется высокая эффективность преобразования, т. е. минимальный общий уровень потерь, или там, где кремниевые элементы не могут удовлетворить требования по температурному диапазону, предельному напряжению или частоте.

Основные преимущества силовых полупроводников на основе SiC или GaN относительно кремниевых элементов:

- меньшие потери проводимости и переключения;
- более высокое блокирующее напряжение;
- более высокая плотность мощности;
- более высокая рабочая температура;
- меньшее время переключения, более высокая рабочая частота.

Чтобы полностью реализовать возможности этих материалов, необходимо внедрение новых технологий, позволяющих заменить традиционную пайку (кристаллы, базовая плата) и ультразвуковую сварку (выводы кристаллов), которые являются наиболее проблемными на пути улучшения мощностных и надежных характеристик силовых ключей.

Литература

1. Винтрих А., Николаи У., Турски В., Райманн Т. Малоизвестные факты из жизни MOSFET/IGBT // Силовая электроника. 2012. № 5, 6. 2013. № 1.
2. Wintrich A., Nicolai U., Tursky W., Reimann T. Application Notes for IGBT and MOSFET modules. SEMIKRON International. 2010.
3. Lehmann J., Netzels M., Pawel S., Doll Th.. Method for Electrical Detection of End-of-Life Failures in Power Semiconductors. Semikron Elektronik GmbH.
4. Freyberg M., Scheuermann U. Measuring Thermal Resistance of Power Modules // PCIM Europe Journal. 2003.
5. Thermal Considerations in the Application of Silicon Rectifier. IR Designer’s Manual. 1991.
6. Calculation of the Maximum Virtual Junction Temperature Reached Under Short-time or Intermittent Duty. IEC 60747-6 by SEMIKRON.