

IGBT или MOSFET: выбирайте с умом

Карл БЛЭЙК (Carl BLAKE)
Крис БУЛЛ (Chris BULL)

С развитием полупроводниковых технологий выбор между применением MOSFET или IGBT в конкретном устройстве становится все более трудным для современного разработчика. В предлагаемой статье приведено несколько основных правил, которые помогут принять решение о выборе типа транзистора.

Эволюция технологий: биполярные транзисторы, MOSFET и IGBT

Биполярный транзистор (БТ) был единственным «реальным» силовым ключом до тех пор, пока в 1970-х годах не появилась технология MOSFET. Для включения биполярного транзистора требуется высокий базовый ток, БТ имеет относительно медленные характеристики выключения (этот эффект известен как токовый «хвост», ему свойственен тепловой пробой вследствие отрицательного температурного коэффициента). Минимально достижимое падение напряжения в открытом состоянии или потери на проводимость определяются напряжением насыщения «коллектор–эмиттер» $V_{CE(SAT)}$.

В отличие от БТ, полевой транзистор представляет собой полупроводниковый прибор, управляемый напряжением, а не током. Ключи MOSFET имеют положительный темпера-

турный коэффициент, что позволяет предотвратить тепловой пробой. Их сопротивление в открытом состоянии может составлять менее 0,1 мОм, поэтому статические потери могут быть гораздо ниже. Кроме того, MOSFET содержит встроенный обратный диод.

Все описанные преимущества, а также отсутствие токового «хвоста» сделали MOSFET оптимальным выбором для силовых преобразователей, работающих в импульсном режиме. Затем, в 1980-х, появились IGBT — биполярные ключи с изолированным затвором, представляющие собой гибрид биполярного транзистора и MOSFET (рис. 1). Выходная характеристика и параметры проводимости IGBT примерно такие же, как у биполярного транзистора, но в отличие от БТ он управляется напряжением, как MOSFET. Другими словами, это означает, что IGBT сочетает высокие нагрузочные характеристики биполярной структуры с простотой управления MOSFET. Однако IGBT имеет и свои

недостатки, к которым можно отнести сравнительно большой токовый «хвост» и отсутствие встроенного обратного диода.

Проблемой ранних версий IGBT была склонность к защелкиванию, но у новых поколений транзисторов такой эффект практически устранен. Другим потенциальным недостатком некоторых типов ключей является отрицательный температурный коэффициент, приводящий к тепловому пробую и усложняющий параллельное соединение. Данный дефект отсутствует у последних поколений IGBT, созданных на основе технологии NPT (Non-Punch Through). Ключи NPT имеют такую же базовую IGBT-структуру (рис. 1), но при их производстве используется кремний с объемной диффузией, а не эпитаксиальный материал, как у ранних IGBT и MOSFET первых поколений.

MOSFET и IGBT: похожи, но очень разные

Структуры MOSFET и IGBT (рис. 1 и 2) на первый взгляд очень похожи, основное отличие состоит в дополнительном p -слое, расположенном под n -подложкой. Технология IGBT безусловно предназначена для применения в приборах с напряжением пробоя выше 1000 В, в то время как MOSFET в основном ориентированы на устройства с рабочим напряжением ниже 250 В. Какой из компонентов предпочтительнее внутри данного диапазона (250–1000 В), зависит от конкретных режимов работы — это могут быть как IGBT, так и MOSFET. При выборе между двумя полупроводниковыми технологиями следует учитывать особенности применения, а также габариты, стоимость, быстродействие и тепловые характеристики.

На рис. 3 показаны границы областей, в пределах которых применение MOSFET или IGBT предпочтительно, некоторые особенности более подробно описаны далее. В большинстве случаев данные рекомендации можно использовать как хорошую отправную точку для предварительного выбора компонента.

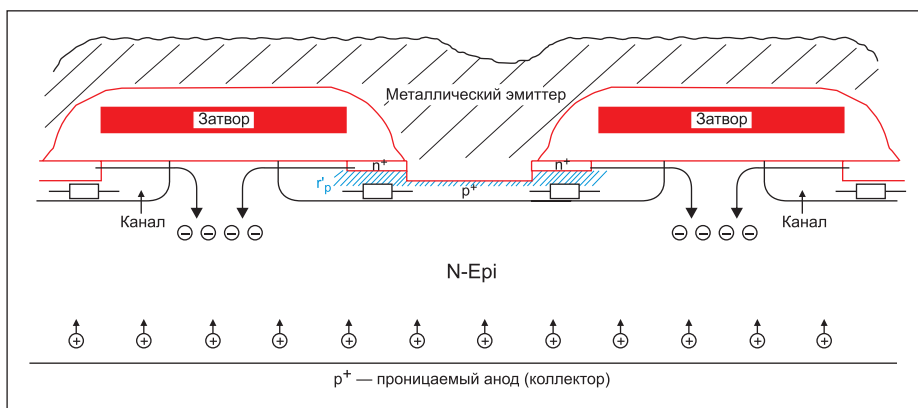


Рис. 1. Поперечное сечение структуры NPT-IGBT

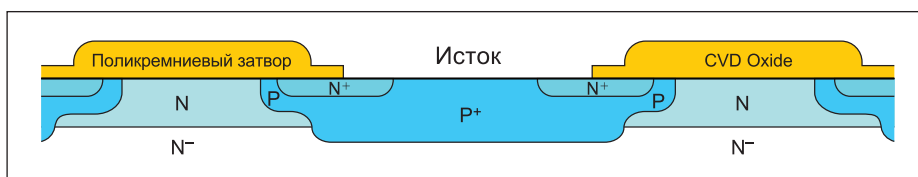


Рис. 2. Поперечное сечение типичной структуры MOSFET

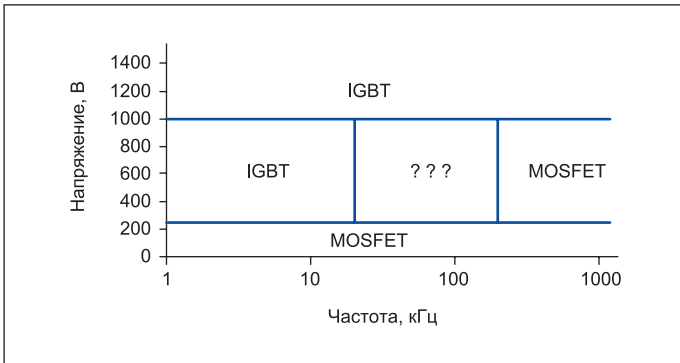


Рис. 3. Области предпочтительных применений MOSFET и IGBT без учета выходной мощности

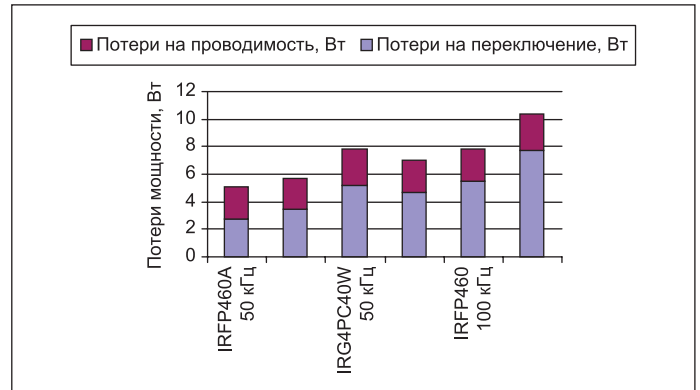


Рис. 5. Режим «жесткой» коммутации PFC (частота 50 и 100 кГц, мощность 300 Вт)

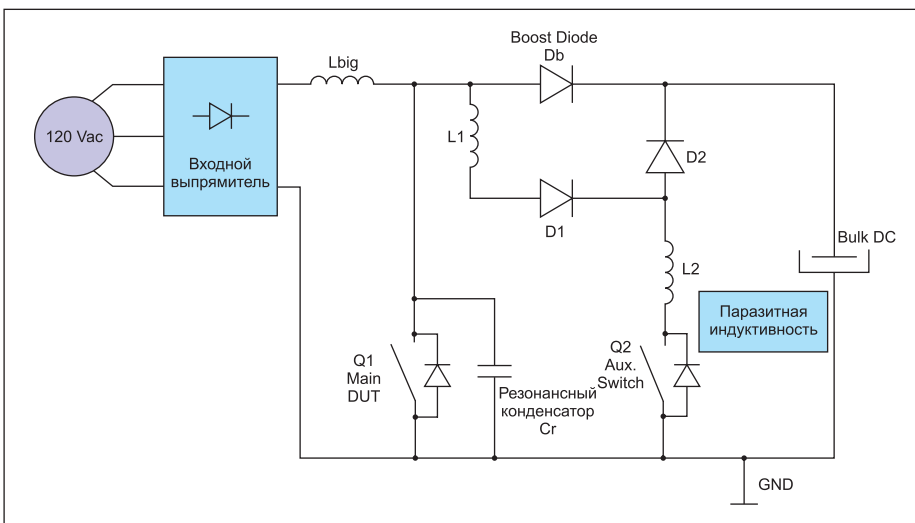


Рис. 4. Типичная схема PFC, работающего в режиме ZVS-коммутации (дополнительный ключ Q2 нужен для сброса заряда вольтодобавочного диода Db, чтобы гарантировать переключение основного транзистора Q1 только при нулевом напряжении. Диод, включенный параллельно Q2, используется только для IGBT)

свыше 500 Вт. В этих случаях окончательный выбор полупроводникового ключа должен производиться на основе таких факторов, как тепловое сопротивление, топология схемы, характеристики проводимости; следует учитывать и конструктив модуля (корпусирование).

Работающий в режиме переключения при нулевом напряжении (Zero-Voltage Switched — ZVS) корректор коэффициента мощности (PFC), схема которого приведена на рис. 4, является примером устройства, находящегося в «области пересечения» технологий IGBT и MOSFET.

Измерения, проведенные в режиме «жесткой» коммутации, ясно показывают, что MOSFET имеют меньшие потери в ориентированных на них устройствах. На рис. 5 видно, что потери IGBT и MOSFET (IRFP460) примерно равны при снижении частоты переключения до 50 кГц. Это позволяет заменить мощные MOSFET на более компактные IGBT в некоторых приложениях, подобная ситуация наблюдалась до 1997 года. Однако теперь выпускаются MOSFET с меньшим зарядом, применение которых позволяет снизить динамические потери, поэтому данная технология вновь доминирует в устройствах, действующих с «жесткой» коммутацией на частотах выше 50 кГц.

На рис. 6 показан уровень потерь устройства, работающего в режиме ZVS (частота 50 кГц, мощность 500 Вт). Потери IGBT при комнатной температуре составляют 9,5 Вт, это выше, чем у MOSFET (7 Вт). С ростом температуры до значений, близких к условиям эксплуатации, потери на проводимость у MOSFET растут быстрее, нежели потери на переключение у IGBT.

Потери MOSFET при повышенной температуре увеличиваются на 60%, а суммарные потери IGBT возрастают лишь на 20%. При мощности нагрузки 300 Вт это делает характеристики обоих ключей почти одинаковыми, а при 500 Вт преимущество оказывается на стороне IGBT.

На рис. 7 демонстрируется уровень потерь в других условиях: 134 кГц, 500 Вт при повышенной температуре. Потери IGBT в этих ус-

Использование IGBT предпочтительно в следующих случаях:

- низкий коэффициент заполнения;
 - низкая частота переключения (<100 кГц);
 - небольшой диапазон изменения тока нагрузки;
 - высокое рабочее напряжение (>600 В);
 - работа при высокой температуре кристалла (>+100 °С);
 - большая выходная мощность (>5 кВт).
- Типичные области применения IGBT:
- управление электродвигателями: рабочая частота <20 кГц, защита от короткого замыкания, ограничение тока перегрузки;
 - источники бесперебойного питания (UPS): постоянная нагрузка, рабочая частота <100 кГц;
 - сварка: высокий средний ток, рабочая частота <50 кГц (допустимо в режиме «мягкой» коммутации ZVS);
 - системы освещения: рабочая частота <100 кГц (допустимо в режиме «мягкой» коммутации ZVS).
- Использование MOSFET предпочтительно в следующих случаях:

- высокая частота переключения (>200 кГц);
 - широкий диапазон изменения тока нагрузки;
 - широкий диапазон изменения коэффициента заполнения;
 - рабочее напряжение <1000 В;
 - низкая выходная мощность (<500 Вт).
- Типичные области применения MOSFET:
- импульсные источники питания (SMPS): высокая частота переключения (>200 кГц);
 - импульсные источники питания (SMPS): режим «мягкой» коммутации ZVS при мощности менее 1000 Вт;
 - зарядные устройства.

Теория против реальности

К сожалению, в жизни все не так просто, как кажется. Во многих реальных приложениях приходится идти на компромиссы и решать спорные вопросы. Цель данной статьи — рассмотрение «пересекающихся» областей, то есть схем, работающих с напряжением выше 250 В на частоте переключения между 10 и 200 кГц и при уровнях мощности

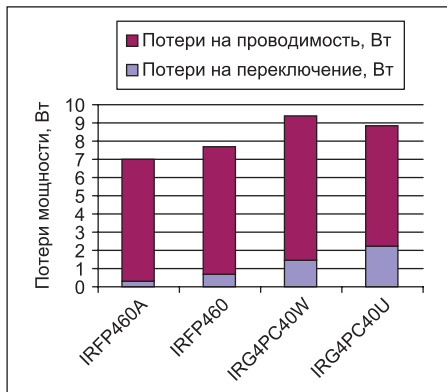


Рис. 6. Режим ZVS PFC
(частота 50 кГц, мощность 500 Вт)

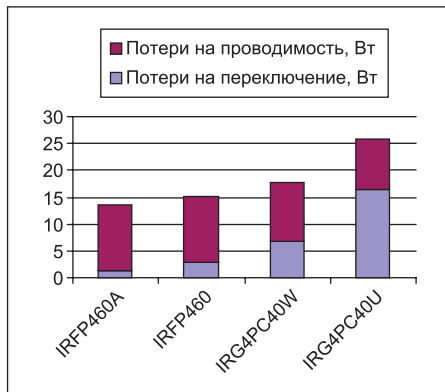


Рис. 7. Режим ZVS PFC
(частота 134 кГц, мощность 500 Вт)

ловиях (25,2 Вт) оказываются чуть выше, чем у MOSFET, чьи суммарные потери составляют 23,9 Вт. При комнатной температуре в одном и том же устройстве величина потерь была 17,8 и 15,1 Вт соответственно. Потери на переключение увеличиваются с ростом частоты, что снижает преимущества IGBT при высокой температуре, но меньшей частоте переключения. Это иллюстрирует основную идею данной статьи: не существует железного правила, пригодного на все случаи и позволяющего определить, какой полупроводниковый прибор будет максимально эффективным для конкретной схемы. В зависимости от заданного уровня мощности, типа рассматриваемого устройства, новейшей технологии, имеющейся для каждого типа транзистора, результат будет меняться незначительно.

Заключение

В непрекращающейся битве между MOSFET и IGBT каждый из транзисторов может демонстрировать преимущество в одной и той же схеме в зависимости от условий эксплуатации. Как же разработчику сделать правильный выбор полупроводникового ключа для конкретного применения? Для принятия правильного решения он должен понимать

особенности работы каждого устройства, а также исходить из известного утверждения, что «если это выглядит слишком хорошо, чтобы быть правдой, это, скорее всего, и есть правда».

Необходимо иметь в виду несколько простых вещей.

Результаты испытаний, а также рекомендации поставщика по условиям работы компонента при максимальном токе и максимальной температуре, скорее всего, приведут к выбору IGBT. Это, например, условия работы погрузчика, когда он поднимает максимально допустимую нагрузку при движении вверх по наклонному пандусу, находясь в полдень в пустыне.

В данном случае IGBT, по-видимому, действительно является лучшим выбором. Но если проанализировать среднюю потребляемую мощность в течение всего рабочего времени, окажется, что на максимальном моменте двигатель используется только 15% времени, а средний момент нагрузки составляет лишь 25% от номинального значения. При средних или типичных условиях работы MOSFET-ключи обеспечивают наибольший срок службы аккумулятора с учетом пиковых уровней нагрузки и, как правило, при меньшей стоимости.

В схемах, работающих на высокой частоте переключения, с малыми длительностями импульсов управления, при низком токе нагрузки, предпочтение будет отдаваться MOSFET-ключам. Так, для применения в источнике питания, действующем при комнатной температуре, номинальной нагрузке и номинальном входном напряжении, MOSFET имеет явное преимущество перед IGBT. Но если источник эксплуатируется при максимальной температуре корпуса, максимальной нагрузке и минимальном напряжении, параметры IGBT окажутся предпочтительнее. Однако реальные условия применения почти никогда не совпадают с номинальными, поэтому при выборе компонентов необходимо учитывать колебания температуры окружающего воздуха, диапазон изменения напряжения питания и тока нагрузки.

Отметим, что некоторые новейшие IGBT-модули способны обеспечить конкурентные экономические и технические характеристики в схеме PFC мощностью 1000 Вт и более при работе в режиме ZVS на частоте 100 кГц и выше. Однако во всех других устройствах питания продолжают безраздельно господствовать MOSFET.

И наконец, существует мнение, что MOSFET — это необновляющееся изделие, от которого не ждут значительного улучшения характеристик в обозримом будущем. В то же время технология IGBT более новая и развивающаяся и должна заменить MOSFET в приложениях с рабочим напряжением выше 400 В.

На самом деле подобные обобщения не являются истиной, и заметные улучшения эффективности MOSFET в течение последних лет безусловно подтверждают, что данная технология динамично развивается и эта тенденция сохраняется. Появление новых MOSFET-ключей International Rectifier с низким зарядом, таких как IRFP460A и IRFP22N50A, позволяет существенно повысить эффективность преобразователей, в то время как IGBT способны быть альтернативой в схемах, работающих в режиме «жесткой» коммутации. ■