

Краткий обзор основных IGBT-технологий

Для опытных инженеров, которые давно занимаются разработкой электроприводов, эта статья о биполярных транзисторах с изолированным затвором (Insulated-Gate Bipolar Transistor, IGBT) — обобщение известных истин. Однако для новичков, которые только недавно начали проектировать электроприводы, используют IGBT в других приложениях и не вполне знакомы с основными технологиями и соответствующей терминологией, этот перевод статьи [1] может стать кратким справочным пособием.

Пол Шимель
(Paul Schimel)

Информация, изложенная в статье, в первую очередь может оказаться полезной при выборе IGBT для нового проекта, так как те некоторые сведения, которые требуется знать о разных типах IGBT, не упоминаются в технических описаниях. Кроме того, во многих справочных руководствах отсутствует информация о технологиях изготовления IGBT. Понимание различий между этими техпроцессами позволяет найти современную замену устройствам IGBT, которые используются в уже существующих приложениях.

Сравнение IGBT с MOSFET

По сравнению с MOSFET процессы обработки поверхности IGBT имеют много схожего, но основные различия в динамических характеристиках этих устройств обусловлены разными структурами нижней поверхности полупроводниковых пластин. Хорошо известные *n*-канальные MOSFET, работающие в режиме обогащения, делятся на планарные и выполненные по технологии Trench. Поперечное сечение этих устройств и направление тока представлены на рис. 1. Электрическое поле, созданное приложенным между

затвором и истоком положительным напряжением значительной величины, вынуждает большое количество носителей дрейфовать от имплантированной *n*-зоны к имплантированной *p*-зоне.

В MOSFET планарного типа большая часть пути тока приходится на боковой дрейф, а меньшая — на отрезок между поворотом на 90° и стоком (рис. 1). Чем длиннее общий путь, включая небольшой отрезок канала, где проводимость модулируется металлическим затвором, тем больше сопротивление $R_{DS(ON)}$ на единицу площади (при том же напряжении V_{DS} и шаге между ячейками).

В Trench MOSFET канал дрейфующих к стоку носителей полностью вертикален, а проводимость модулируется в намного большей степени за счет большей площади металлического затвора, расположенного по сторонам канала. В результате сопротивление $R_{DS(ON)}$ у транзисторов этого типа меньше по сравнению с планарными устройствами. В обоих случаях электроны дрейфуют от истока по *n*- и *p*-каналам в подложку *n*-типа, обеспечивая так называемое открытое состояние транзистора.

Как известно, в *n*-канальном MOSFET, работающем в режиме обогащения, имеется внутренняя

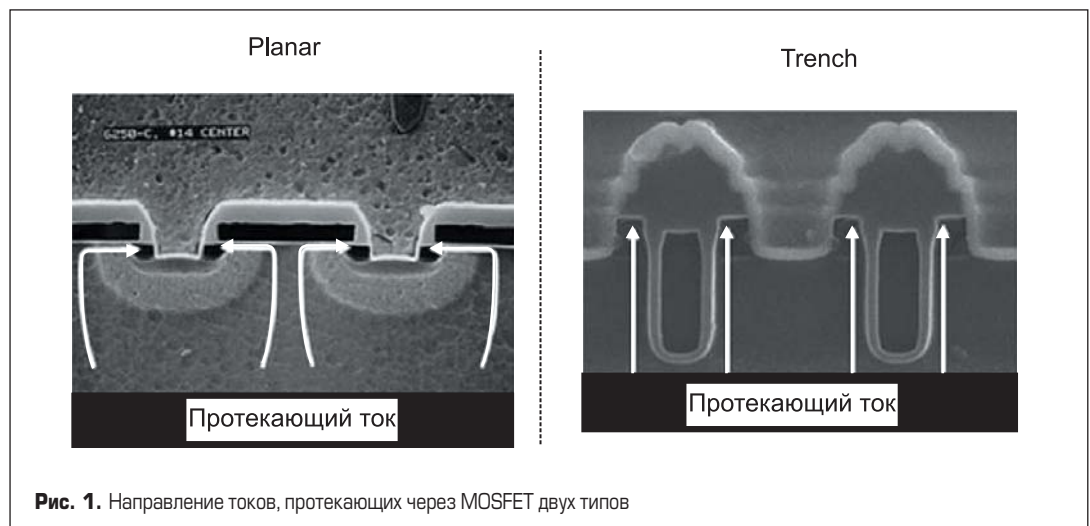


Рис. 1. Направление токов, протекающих через MOSFET двух типов

p-p-структура. Работа этого устройства редко вызывает проблемы благодаря тому, что его переход «база–эмиттер» практически закорочен металлизированным покрытием электрода истока. Если напряжение между стоком и истоком устройства достаточно быстро увеличивается при протекании заряда в биполярный транзистор от обратной емкости C_{RSS} , он может включиться, а затвор — потерять способность к управлению. И хотя защелкивания не происходит, поскольку прекращается управление только биполярным транзистором, последствия могут быть катастрофическими. Большинство приложений нечувствительно к этому режиму работы из-за паразитных элементов, которые ограничивают скорость нарастания фронта V_{DS} .

IGBT работает схожим образом, но за счет слоя p^+ на нижней поверхности полупроводниковой пластины. Кристаллы IGBT, выполненные по технологии PT (punch-through), имеют достаточно большую толщину — порядка 200 мкм у 600-В устройств. Главным образом это обусловлено очень толстым эпитаксиальным слоем p^+ (около 100 мкм), нанесенным на заднюю поверхность подложки *n*-типа. Эти устройства также имеют буферный слой n^+ , который нанесен непосредственно поверх слоя p^+ . Именно благодаря этому слою n^+ возник термин punch-through («смыкание *p-n*-перехода»). С этой точки зрения, это устройство очень напоминает по строению планарный MOSFET.

Для объяснения работы механизма punch-through следует принять два допущения. Вывод коллектора IGBT фактически представляет собой эмиттер внутреннего биполярного *p-n-p*-транзистора. Следует учитывать динамические характеристики этого устройства.

В случае сильно легированных *n*- и *p*-каналов перехода «база–эмиттер» обеспечивается более высокий коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером и меньшее напряжение $V_{CE(SAT)}$, чем при использовании слаболегированной зоны n^+ . Чем указанной коэффициент усиления выше, тем ниже V_{CEO} относительно V_{CBO} биполярного транзистора. (Опытные инженеры могут по этому случаю вспомнить, как в свое время выбирали биполярные транзисторы с небольшим коэффициентом усиления по току для импульсных источников питания, а затем пропорциональный управляющий сигнал для базы, чтобы вывести транзисторы из насыщения).

IGBT, выполненные по технологии PT, преодолевают эти асимптотические пределы. Как только IGBT начинает выключаться, напряжение V_{CBO} *p-n-p*-транзистора блокирует напряжение. Следует заметить, что переход «коллектор–база» *p-n-p*-транзистора находится рядом с верхней поверхностью этого устройства. Между *p-n-p*-коллектором верхней части IGBT (эмиттером устройства) и переходом «база–эмиттер» с рекомбинирующими носителями начинает появляться высокое напряжение. Оно приводит к возникновению электрического поля, которое убывает по мере удаления от верхней части устройства к внутреннему граничному слою n/n^+ . Если поле

достаточно велико у этого граничного слоя, переход «коллектор–база» распространяется в буферный слой n^+ . В результате переход «база–эмиттер» внутреннего *p-n-p*-транзистора очень быстро закрывается, «хвост» тока становится короче по сравнению с «хвостом» в устройствах типа NPT (non-punch-through), у которых этот буферный слой отсутствует.

IGBT, выполненные по технологии PT, например транзисторы 4-го поколения от компании International Rectifier (IR), имеют отрицательный температурный коэффициент. Это значит, что напряжение V_{CE} уменьшается с увеличением температуры, что затрудняет возможность параллельного соединения устройств и вынуждает тщательно подбирать соответствующее значение V_{CE} . Расчетное время короткого замыкания, как правило, невелико и не устанавливается. Это обусловлено относительно высоким коэффициентом усиления по току биполярного транзистора и неспособностью точно управлять крутизной *n*-канального MOSFET, чтобы ограничить максимальный ток и, как следствие, максимальную рассеиваемую мощность.

NPT–устройства

В отличие от PT IGBT, NPT-транзисторы, например 4-го поколения от компании IR, имеют легированную зону p^+ на нижней стороне подложки *n*-типа. Поскольку эта зона сравнительно небольшой толщины, обработка подложки обходится дешевле. Буферный слой n^+ отсутствует. Несмотря на внешнее сходство, разница между этими двумя структурами устройств значительная. Состояния включения и выключения реализуются схожим образом, но в NPT-транзисторах отсутствует эффект смыкания, что позволяет сократить время накопления заряда и побуждает рекомбинировать носители в переходе «база–эмиттер» собственной *p-n-p*-структуры. В результате «хвост» коллекторного тока при выключении NPT-транзисторов немного длиннее, чем у PT-устройств, а остальные характеристики идентичны.

Из-за меньшего коэффициента усиления по току в собственной *p-n-p*-структуре напряжение $V_{CE(SAT)}$ PT-транзисторов несколько выше, чем у NPT, благодаря чему легче управлять максимальным током *p-n-p*-транзистора с меньшим коэффициентом усиления с помощью собственного *n*-канального MOSFET. Это значит, что длительность короткого замыкания NPT-устройства хорошо определяется и контролируется. Значение этого параметра у NPT IGBT находится в диапазоне до 10 мкс.

Наконец, характеристики *n*-канального MOSFET преобладают над NPT IGBT. Это значит, что напряжение $V_{CE(SAT)}$ увеличивается с ростом температуры, позволяя соединять эти устройства параллельно друг другу.

Field-Stop IGBT

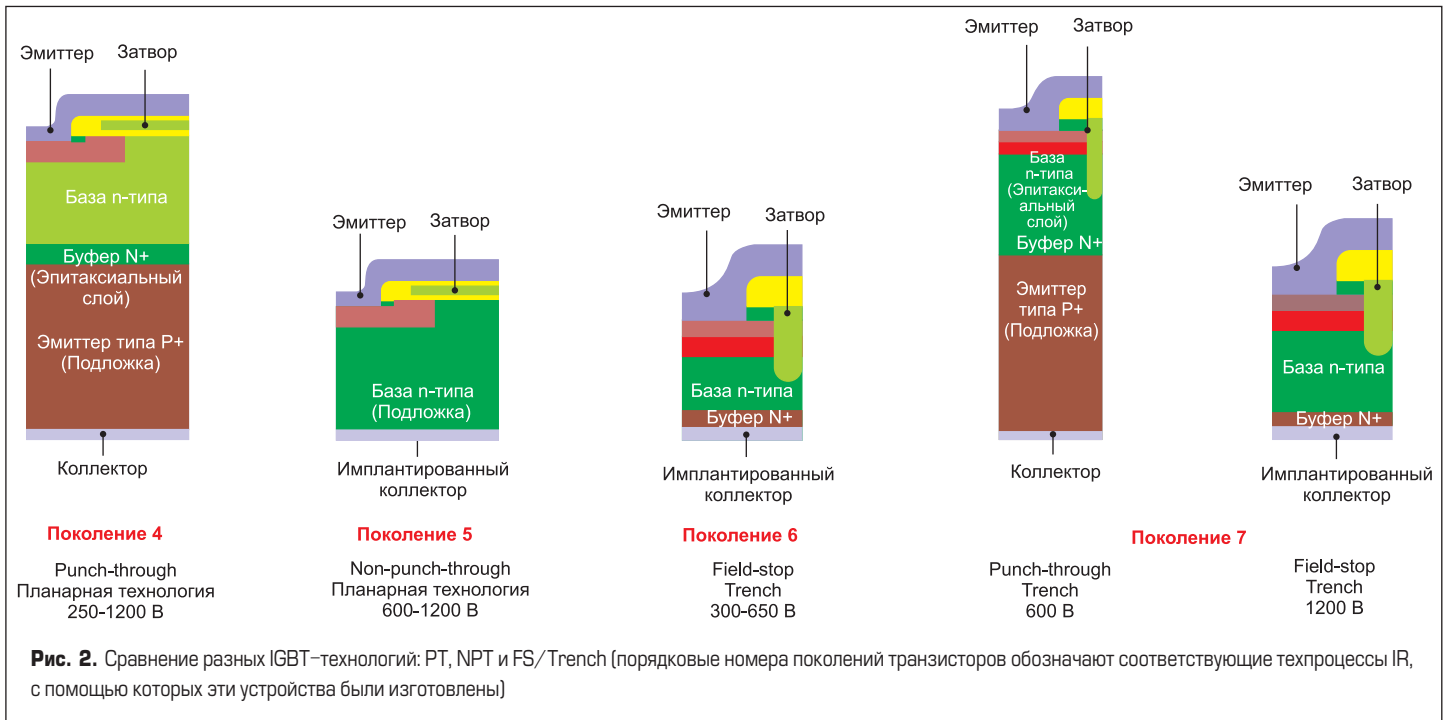
Рассмотрим совершенно новое устройство из семейства IGBT — очень эффективные IGBT семейства Field Stop. Сама по себе эта

технология позволяет уменьшить напряженные насыщения за счет намного меньшей толщины подложки. В этом случае относительно тонкий слой n^+ обедняется при закрытии перехода «коллектор–база» и смыкается с тонким хорошо управляемым слоем n^+ , в котором рост электрического поля прекращается. Транзисторы, выполненные по технологии Field-Stop, имеют очень малую толщину по сравнению с устройствами NPT и PT. Благодаря использованию слоя n^+ , прекращающего дальнейшее распространение электрического поля, Field-Stop IGBT можно отнести к семейству PT-устройств. Однако транзисторы Field-Stop намного лучше управляются, чем их предшественники PT.

IGBT, появившиеся на базе технологии MOSFET, относятся к Trench-устройствам, как, например, транзисторы IR 7-го поколения. Как уже упоминалось, технология Trench позволяет с помощью затворного напряжения той же величины модулировать намного большую область дрейфа, увеличивая коэффициент усиления *n*-канального MOSFET, уменьшая расстояние до стока и величину сопротивления в открытом состоянии. Траектория прохождения тока в этом случае представляет собой вертикальную прямую линию, идущую от коллектора к эмиттеру. Меньшее значение $R_{DS(ON)}$ MOSFET наряду с более высоким коэффициентом усиления биполярного транзистора за счет тонкого буферного слоя n^+ обеспечивает меньшее напряжение $V_{CE(SAT)}$. На рис. 2 сравниваются разные IGBT-структуры.

Комбинация технологий Trench и Field-Stop при создании, например, 1200-В семейств транзисторов IR 6-го и 7-го поколений обеспечивает меньшее значение $R_{DS(ON)}$ и толщину устройства, больший коэффициент усиления канала и наличие зоны n^+ Field-Stop, благодаря чему появляется возможность использовать устройство в параллельных конфигурациях при минимальном времени накопления заряда и большей устойчивости к намного более высоким температурам. Из-за тонкого перехода «база–коллектор» в собственном *p-n-p*-транзисторе при значительном токе может возникнуть нехватка носителей и состояние ненасыщения. Поскольку максимальный ток короткого замыкания ограничен, упрощается механизм противодействия возникновению этих условий.

У всех этих устройств общий механизм отказа. У MOSFET, который мы рассмотрели выше, имеется внутренний *p-n-p*-транзистор, расположенный параллельно выводам стока и истока. Переход «база–эмиттер» этого *p-n-p*-транзистора закорочен металлизированным покрытием истока вдоль *n*- и *p*-каналов. В IGBT имеется дополнительный *p*-слой на обратной стороне устройства, благодаря которому тиристор формируется из этого паразитного *p-n-p*-транзистора (*n-p-n-p*). В отличие от MOSFET, который может пропустить большой импульс тока коммутации через емкость C_{RSS} , IGBT в этих условиях полностью защелкивается. Коэффициенты усиления этих переходов тщательно контролируются, но при нарушении установленных режимов IGBT защелкивается.



Чего нет в технических описаниях

При поиске подходящего устройства для конкретного приложения используются руководства по выбору, с помощью которых выясняются требуемые характеристики — напряжение, ток, частота коммутации и другие параметры. В одних случаях эти руководства хорошо справляются со своей задачей, в других имеются досадные ограничения.

Как правило, информация о рассмотренных выше технологиях не предоставляется в технических описаниях, несмотря на то, что эти материалы широко используются на семинарах, производстве и при обсуждении характеристик устройств. Может быть, настало время дополнить технические описания необходимой информацией?

Очевидно, что при выборе списка материалов, например для силового преобразователя или его замены современным устройством, знание о технологии его построения окажет разработчику неоценимую услугу.

Предположим, необходимо создать емкостный регулятор яркости, управляемый несфазированным полным мостом ZVT (Zero Volt Switching — коммутация при нулевом напря-

жении). При этом следует понять, подойдет ли с этой целью резонансная топология. Ответ на этот вопрос положителен в тех случаях, когда ток нагрузки достаточно велик, чтобы в первичной индуктивности рассеяния накопилась энергия примерно той же величины, что и в емкости C_{OSS} противоположного IGBT в полумостовых схемах. В иных случаях выбирается жесткая коммутация. Таким образом, используются и мягкая, и жесткая коммутация. Однако ни одно руководство по выбору не дает ответа на этот важный вопрос.

При разработке электропривода возникают и другие вопросы, на которые не найти ответа в руководстве по выбору. Нужна ли в схеме защита от короткого замыкания? Как правило, нет, поскольку у привода отсутствуют незащищенные выводы и потому вероятность их замыкания нулевая. В рассматриваемом примере разработчику следует обеспечить малые значения C_{OSS} (выходная емкость), Q_G (заряд затвора), C_{RSS} (емкость обратного смещения), E_{OFF} (энергия выключения) и Q_{RR} (заряд обратного восстановления диода). Этот набор параметров реализуется с помощью любой технологии — PT, NPT или Field-Stop/Trench — в зависимости от частоты коммутации.

Для выбора оптимального устройства следует обсуждать эти приложения с инженерами по применению и производителями. Следует также выбрать диод, соответствующий конкретной IGBT-технологии. Как правило, предпочтителен выбор диодов с малым значением Q_{RR} . Высокие значения I_{RR} , Q_{RR} и t_{RR} могут стать причинами большого шума.

Итак, этот краткий обзор IGBT-технологий можно рассматривать как пособие для проектирования не только стандартных, но и новых приложений, в отношении которых наблюдается нехватка важной информации.

Литература

1. Mohan N., Undeland T., Robbins W. Power Electronics: Converters, Applications and Design. John Wiley and Sons. Third Edition. 2003.
2. IGBT Characteristics. IR application note AN-983.
3. Wood P., Battello M., Keskar N., Guerra A. IPM Application Overview, Integrated Power Module for Appliance Motor Drives. International Rectifier application note AN1044 rev. A.