

Новая технология PT IGBT против мощных полевых МОП транзисторов.

Инна Щукина,
Михаил Некрасов
mik@icquest.ru

Последнее время пристальное внимание разработчиков, в области силовой электроники, сконцентрировано на стремительном развитии последних технологий биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), и в частности, возможности их использования как недорогой альтернативы мощным полевым МОП транзисторам.

В данной статье приводится сравнение динамических характеристик, потерь на переключение и проводимости мощных полевых МОП транзисторов и биполярных транзисторов с изолированным затвором PT (Punch Through) новой технологии IGBT Advanced Power Technology Power MOS 7[®]. Также рассматривается использование последних в некоторых типовых, наиболее распространенных схемах включения.

О компании Advanced Power Technology.

Компания Advanced Power Technology (АРТ) является признанным лидером в разработке и производстве высококачественных силовых полупроводниковых приборов. Диапазон продукции Advanced Power Technology достаточно широк и объединяет в себе различные направления. Это и дискретные устройства – биполярные транзисторы с изолированным затвором, мощные полевые транзисторы, диоды на основе барьера Шоттки и диоды с быстрым восстановлением; и модульные сборки на основе кристаллов дискретных элементов. Кроме того, АРТ выпускает устройства с повышенными эксплуатационными характеристиками для военной и аэрокосмической промышленности и мощные высокочастотные транзисторы.

Сегодня мы постараемся поподробнее рассмотреть одно из направлений силовых полупроводниковых приборов – линию дискретных биполярных транзисторов с изолированным затвором PT IGBT, выполненных по новой технологии Advanced Power Technology Power MOS 7[®].

Структура PT IGBT.

Всем известно, что биполярные транзисторы с изолированным затвором обладают преимуществами легкого управления полевыми МОП транзисторов и низкими потерями проводимости, характерными для биполярных транзисторов. Традиционно IGBT используют в применениях, где необходимо работать с высокими токами и напряжениями. Сегодня Advanced Power Technology представляет новое поколение PT IGBT, которое позволяет сбалансировать потери на переключение и проводимости, и использовать биполярные транзисторы с изолированным затвором в области высоких частот, где обычно применяются полевые МОП транзисторы, одновременно обеспечивая высокий КПД.

Общая структура PT IGBT представлена на рис. 1. Как видно из рисунка, структура PT IGBT практически идентична структуре других топологий биполярных транзисторов с изолированным затвором.

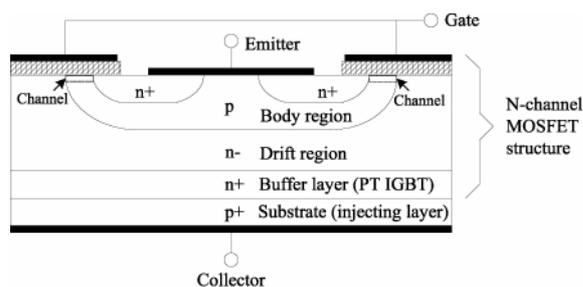


Рисунок 1. Структура PT IGBT .

Особенностью структуры PT IGBT является наличие комбинации инжектирующего слоя p^+ и буферного слоя n^+ . Благодаря высокой инжектирующей способности слоя p^+ , буферный слой контролирует коэффициент передачи транзистора при помощи ограничения числа дырок, которые были изначально введены в область дрейфа. В связи с тем, что время жизни неосновных носителей в буферном слое намного ниже, чем в области дрейфа, буферный слой поглощает захваченные дырки в момент выключения.

В дополнение к работе буферного слоя n^+ , «хвостовой» ток в PT IGBT контролируется ограничением общего времени жизни неосновных носителей до того, как они рекомбинируют. Это свойство называется управлением временем жизни неосновных носителей. Облучение электронами в процессе производства создает дополнительные рекомбинационные центры во всем пространстве кристалла кремния, которые существенно уменьшают время жизни неосновных носителей и, следовательно, хвостовой ток. Дырки быстро рекомбинируют, даже при условии отсутствия напряжения в устройстве, характерного для режима мягкого переключения.

Устройства нового поколения PT IGBT Power MOS 7[®] выделяются среди прочих IGBT высокой скоростью переключений. Этому способствует металлическая полосковая топология затвора. В результате применения данной топологии, устройства обладают очень низким внутренним эквивалентным сопротивлением затвора (EGR), доли Ом; гораздо меньшим, чем у устройств с поликремниевым затвором. Низкое сопротивление затвора дает возможность быстрее осуществлять переключения и, следовательно, уменьшить потери. Полосковая металлическая топология обеспечивает равномерное и быстрое возбуждение затвора, уменьшая нагрев при переходных процессах и повышая надежность. И наконец, полосковая структура затвора более устойчива к дефектам, которые неизбежно возникают во время производства, и улучшает выносливость и надежность устройства, особенно в режиме работы транзистора при высоком токе и высокой температуре.

Управление PT IGBT Power MOS 7[®] очень похоже на управление традиционными полевыми МОП транзисторами. При прямой замене полевых транзисторов устройствами PT IGBT Power MOS 7[®] в высокочастотных применениях, можно использовать те же уровни, даже если они составляют всего 10В. Хотя, в этих случаях, рекомендуемые значения управляющего напряжения затвора, для уменьшения потерь при включении, составляет 12 – 15В, как для биполярных транзисторов с изолированным затвором, так и для полевых МОП транзисторов.

Потери на переключение и потери проводимости.

Динамические характеристики включения биполярных транзисторов с изолированным затвором практически идентичны характеристикам полевых МОП транзисторов. При выключении, есть различия, связанные с наличием хвостового тока. Подавить хвостовой ток полностью не удастся, и поэтому у IGBT импульсная энергия выключения намного больше энергии включения. Стремление получить высокие динамические характеристики и сокращение потерь на переключение приводит к росту потерь проводимости, поэтому перед разработчиками часто стоит проблема выбора оптимального соотношения. Чтобы уменьшить потери проводимости, импульсная энергия должна увеличиваться и наоборот, а снижение напряжения приводит к росту потерь на переключение.

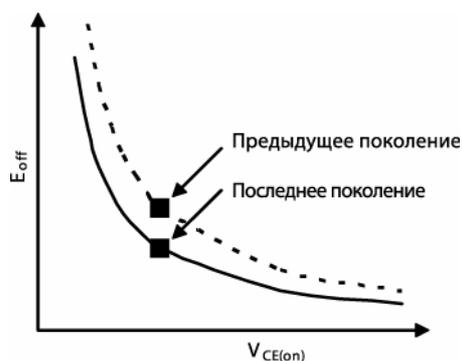


Рисунок 2. Зависимость импульсной энергии E_{off} от напряжения $V_{CE(on)}$.

Рисунок 2 изображает выбор оптимального соотношения между импульсной энергией выключения E_{off} и напряжением коллектор-эмиттер в открытом состоянии транзистора $V_{CE(on)}$. Представлены зависимости для двух поколений IGBT: характеристика предыдущего поколения IGBT и характеристика нового поколения Advanced Power Technology PT IGBT Power MOS 7[®]. При использовании устройств нового поколения PT IGBT удается снизить энергию выключения на 30-50% без значительного увеличения $V_{CE(on)}$. Результатом этого является повышение КПД в импульсных источниках питания, использующих PT IGBT новой технологии Advanced Power Technology Power MOS 7[®].

Рабочие частоты и токи.

Одним из самых удобных методов сравнения производительности различных устройств, таких, например, как IGBT и полевые МОП транзисторы, является зависимость рабочей частоты от тока. Удобство метода заключается в том, что можно увидеть не только потери проводимости, но и потери на переключение, и оценить тепловое сопротивление.

На рисунке 3 изображены кривые зависимости частоты и тока для трех устройств: одного PT IGBT и двух мощных полевых МОП транзисторов. Все три устройства являются устройствами нового поколения Power MOS 7[®] производства АРТ.

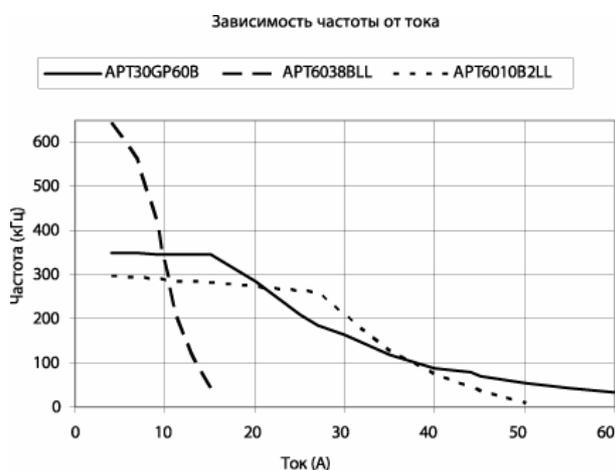


Рисунок 3. Зависимость рабочей частоты от тока.

АРТ30ГР60В – это биполярный транзистор с изолированным затвором нового семейства PT IGBT Power MOS 7[®], с рабочим напряжением 600В и номинальным значением прямого тока $I_{C2} = 49А$ в корпусе ТО-247. Устройства АРТ6038ВЛЛ и АРТ6010В2ЛЛ – это полевые МОП транзисторы АРТ Power MOS 7[®], с рабочим напряжением 600В и номинальными значениями прямых токов $I_D = 17$ и $54А$ соответственно. Транзистор АРТ6038ВЛЛ выполнен в корпусе ТО-247, а АРТ6010В2ЛЛ в корпусе Т-МАХ™ (схожий с ТО-247).

В качестве условий тестирования были выбраны следующие параметры: режим жесткого переключения с индуктивной нагрузкой, рабочее напряжение 400В, температура перехода $T_j=175^{\circ}C$, температура корпуса $T_c=75^{\circ}C$, рабочий цикл 50% и общее сопротивление затвора 5 Ом. Совместно с каждым устройством использовался диод сверхбыстрого восстановления на 15А, 600В в качестве фиксирующего диода. Тестируемая схема представляла собой типовую топологию для индуктивных нагрузок.

Устройства АРТ30ГР60В и АРТ6038ВЛЛ имеют одинаковые размеры кристалла, а размер кристалла АРТ6010В2ЛЛ примерно в 3 раза больше. Обычно, стоимость устройства зависит от площади кристалла, поэтому устройства с требуемыми характеристиками построенные на меньшем по площади кристалле, стоят, как правило, дешевле.

Предположим, что нам необходимо обеспечить импульсный ток 8А на частоте 200кГц. Исходя из зависимостей на рис. 3, становится ясно, что полевой МОП транзистор АРТ6038ВЛЛ – наилучший выбор, т.к. он может работать со значительно большими частотами, чем другие устройства. Теперь предположим, что требуется обеспечить ток 20А на частоте 200кГц. Такой ток

будет способен обеспечить как РТ IGBT АРТ30GP60В, так и полевой МОП транзистор АРТ6010В2LL. Однако РТ IGBT АРТ30GP60В будет стоить в три раза меньше, чем транзистор АРТ6010В2LL, в связи с уменьшенным размером кристалла. Полевой МОП транзистор АРТ6038ВLL полностью отпадает. При токе свыше 37А, РТ IGBT имеет все преимущества, даже не смотря на то, что обладает меньшим размером кристалла; при таких рабочих частотах температура перехода IGBT будет ниже, чем у полевого МОП транзистора. Этот пример идет вразрез с общепринятым мнением, что полевые МОП транзисторы всегда работают эффективнее, чем IGBT, и высокая эффективность подразумевает высокую стоимость.

Для более корректного анализа стоит сделать еще несколько замечаний.

Во-первых, значение прямого тока I_D полевого МОП транзистора АРТ6038ВLL составляет 17А, но в нашем случае этот транзистор вряд ли сможет обеспечить ток более 10 А. При других условиях, таких, например, как короткий рабочий цикл, транзистор сможет обеспечить прямой ток близкий к номинальному значению. Номинальное значение прямого тока не может показать нам реальное значение тока для нашего применения, т.к. измеряется оно в непрерывном режиме (без потерь на переключение) и при определенной температуре. В основном номинальное значение прямого тока показывает относительную величину тока и потери проводимости в устройстве.

Во-вторых, общее сравнение показывает, что значение прямого тока I_D полевого МОП транзистора АРТ6010В2LL (при непрерывном режиме с температурой корпуса 25°C) близко к значению прямого тока I_{C2} IGBT АРТ30GP60В (при непрерывном режиме с температурой корпуса 110°C), 54 и 49 А соответственно. Эти характеристики весьма схожи между собой, производительность этих двух устройств тоже практически одинаковая. Оба устройства могут работать на частоте 200кГц при рабочих токах в половину меньших номинальных значений тока.

В-третьих, биполярные транзисторы обладают большей плотностью тока, чем полевые МОП транзисторы, благодаря чему IGBT используют кристаллы меньшего размера с тем же уровнем мощности, что и МОП транзисторы. Из-за значительного увеличения сопротивления в открытом состоянии, полевые МОП транзисторы обладают гораздо меньшей плотностью тока при рабочих напряжениях свыше 300В. И здесь гораздо целесообразнее использовать IGBT.

В завершении, надо отметить что необходимо понимание относительной эффективности того или иного устройства при применении в различных условиях. На высоких частотах и сравнительно низких токах, предпочтение отдается, как правило, полевым МОП транзисторам (или же РТ IGBT малых размеров). IGBT является лучшим решением в применениях, где требуется большой ток, так как потери проводимости умеренно увеличиваются с увеличением тока, в то время как значения потерь проводимости мощного полевого МОП транзистора пропорциональны квадрату значения тока. В большинстве частотных и токовых диапазонов могут применяться различные устройства, однако, последнее поколение РТ IGBT Power MOS 7[®] выступает как самое недорогое решение для разработчиков.

Температурные эффекты.

Скорость включения в импульсном режиме работы и потери для биполярных транзисторов с изолированным затвором и полевых МОП транзисторов практически не зависят от температуры. Между тем, в режиме жесткого переключения, обратный ток восстановления диода увеличивается с увеличением температуры, что увеличивает потери на переключение. Скорость выключения полевых МОП транзисторов также, в сущности, не связана с температурой, но скорость выключения IGBT ухудшается и потери на переключение, соответственно, увеличиваются с ростом температуры. Тем не менее в транзисторах РТ IGBT Power MOS 7[®] потери сохраняются практически на прежнем уровне, благодаря контролю над временем жизни неосновных носителей.

Одним из основных недостатков обычных IGBT-транзисторов является отрицательный температурный коэффициент (ТК) по напряжению насыщения ($V_{CE(on)}$), что нарушает баланс токов при параллельном соединении транзисторов.

На рис.4 представлены зависимости, характеризующие температурный коэффициент IGBT АРТ65GP60В2.

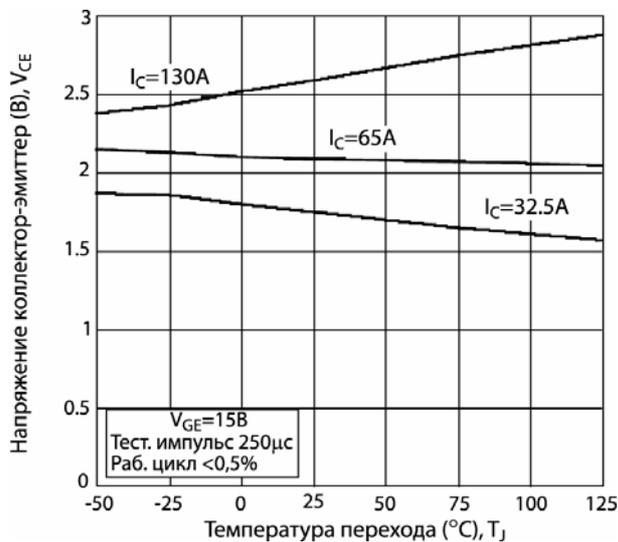


Рисунок 4. Температурный коэффициент IGBT APT65GP60B2

Из рисунка видно, что температурный коэффициент слегка меняется в зависимости от тока коллектора, от отрицательного значения при токе меньше 65А (нулевому ТК соответствует ток 75А на рис. не показан) до положительного при токе большем 75А. На это свойство специально был сделан упор при разработке РТ IGBT Advanced Power Technology Power MOS 7[®] нового поколения. Данное свойство позволяет достаточно просто осуществлять параллельное включение устройств.

В отличие от РТ IGBT полевые МОП транзисторы обладают жестким положительным температурным коэффициентом, что приводит к потере проводимости при соединении более чем двух устройств, при условии их работы в температурном диапазоне 25-125°С.

Применение в системах импульсных источников питания (SMPS). Усилительный преобразователь в режиме жесткого переключения.

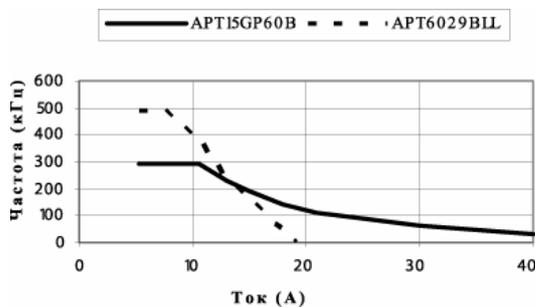


Рисунок 5. Исполнение в схеме SMPS. Зависимость частоты усиления от тока.

На рис 5. дано сравнение зависимостей рабочей частоты и прямого тока устройств РТ IGBT APT15GP60B ($I_{C2} = 27A$) и полевого МОП транзистора APT6029BLL ($I_D = 21A$). Условия были выбраны те же, что и ранее: режим жесткого переключения с индуктивной нагрузкой, рабочее напряжение 400В, температура перехода $T_j = 175^\circ C$, температура корпуса $T_c = 75^\circ C$, рабочий цикл 50% и общее сопротивление затвора 5 Ом. Совместно с каждым устройством использовался диод сверхбыстрого восстановления на 15А, 600В в качестве фиксирующего диода. Из приведенных зависимостей видно, что каждое устройство может работать с частотой 200 кГц и током 14 А. При более высоких токах, более привлекательной альтернативой является использование IGBT, т.к. при этом его рабочая частота выше, чем полевого МОП транзистора. IGBT APT15GP60B обладает меньшими размерами кристалла, и соответственно дешевле. При значениях тока ниже 14А, полевой МОП транзистор может работать с более высокой частотой, и это означает, что использование полевого МОП транзистора в этих условиях эффективнее, чем использование IGBT.

Фазосдвигающий мост.

На рисунке 6 приведена зависимость максимальной рабочей частоты и тока для устройств, схожих с предыдущими. APT6029BFLL – это транзистор из семейства FREDFET (полевой МОП транзистор со встроенным быстрым диодом) и APT15GP60BDF1 – COMBI IGBT (IGBT со встроенным диодом быстрого восстановления). Оба устройства могут использоваться в построении мостовых схем.

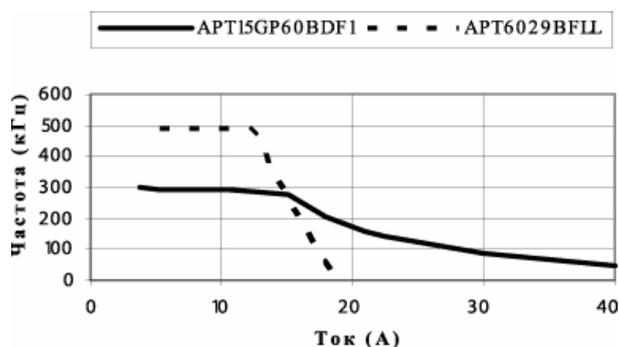


Рисунок 6. Зависимость рабочей частоты от тока для фазосдвигающего моста

Анализируемая схема представляет собой ключ нулевого напряжения, что характерно для режима жесткого переключения. Из рисунка 6 видно, что кривые зависимости частоты от тока просто смещены в область более высоких значений тока, если сравнивать с рисунком 5 для усилительного преобразователя в режиме жесткого переключения. На самом деле необходимо отметить, что кривые IGBT смещены дальше, чем кривые полевого МОП транзистора. Это обусловлено тем, что IGBT обладает меньшими потерями проводимости, чем полевой МОП транзистор. При рабочем токе свыше 13А, основные потери полевого МОП транзистора обусловлены потерями проводимости. При значении тока 15А, у полевого МОП транзистора APT6029BLF теряется 75 Вт мощности в связи с потерями проводимости, в то время как у PT IGBT APT15GP60BDF1 около 14 Вт. Потери на переключение преобладают над потерями проводимости IGBT вплоть до уровня рабочего тока 40А. При токе свыше 40А, потери проводимости IGBT становятся больше чем потери на переключение.

Когда значение рабочей частоты ниже 300кГц, IGBT обладает преимуществом режима мягкого включения в схеме фазосдвигающего моста, т.к. допустимое максимальное значение рабочего тока больше, чем у полевого МОП транзистора. Малые потери на переключение IGBT в результате мягкого переключения, дополнены малыми потерями проводимости. Таким образом, семейство Power MOS 7[®] PT IGBT находит свое применение как в схемах мягкого, так и жесткого переключения.

Заключение.

Новое поколение транзисторов с изолированным затвором Advanced Power Technology PT IGBT Power MOS 7[®] обладает совокупностью значительно улучшенных динамических характеристик, малыми потерями проводимости и универсальной способностью мягкого переключения. Дополнив эти преимущества немаловажным фактором – невысокой стоимостью – новое поколение транзисторов PT IGBT Power MOS 7[®] действительно может заменить полевые МОП транзисторы в применениях импульсного электропитания. Теперь уже трудно сказать, насколько долго продержаться высоковольтные полевые МОП транзисторы в составе устройств питания. Скорее всего, в будущем, биполярные транзисторы с изолированным затвором займут их место.

Литература: Application Note - APT0302: “Latest Technology PT IGBTs vs. Power MOSFETs”

За дополнительной информацией просим Вас обращаться в компанию "Квест"



<http://www.icquest.ru>
E-mail:info@icquest.ru

Россия, Ленинградская обл.
г. Выборг

info@icquest.ru www.icquest.ru
т./ф. (81378) 2-80-67, 3-27-55 Россия, г. Выборг

тел: (81378) 2 80 67
факс: (81378) 3 27 55