

ЧТО НУЖНО ДЕЛАТЬ И ЧЕГО НЕЛЬЗЯ, ИСПОЛЬЗУЯ МОЩНЫЕ МОП-ТРАНЗИСТОРЫ

Аннотация

Как и все мощные полупроводниковые приборы, мощные МОП ПТ имеют свои собственные технические тонкости, которые должны правильно пониматься, если разработчик хочет добиться наиболее эффективного применения. В этой статье поясняется в первом приближении, что можно делать и что нельзя при использовании мощных МОП ПТ.

Введение

Мощные МОП ПТ имеют много преимуществ перед обычными биполярными транзисторами как в линейном режиме, так и в режиме переключения. Эти преимущества включают в себя очень быстрое переключение, отсутствие вторичного пробоя, широкую область безопасной работы и очень высокий коэффициент усиления. Типовые применения следующие: высокочастотные импульсные источники питания, системы преобразователей и инверторов для управления скоростью электродвигателей постоянного и переменного тока, высокочастотные генераторы для индукционного нагрева, ультразвуковые генераторы, звуковые усилители, периферийные устройства для компьютеров, оборудование для телекоммуникаций и различная техника для военных и космических целей.

Существуют несколько основных типов мощных МОП ПТ. Первоначальные разработки использовали структуры с так называемыми V-канавками и U-канавками, в то время как тенденции сегодняшнего дня ведут к вертикальной D-MOS технологии с конфигурацией истока в виде замкнутых ячеек. Эта технология впервые была применена в структуре МОП ПТ, показанной на рис.1. Ток протекает вертикально через кремний от стока, через тело прибора, затем горизонтально через область канала и вертикально вытекает из истока, как показано. Ток транзистора управляется напряжением, приложенным между выводами затвора и стока. Прикладываемое напряжение затвора устанавливает поле в области канала, которое модулирует сопротивление прибора. Затвор изолирован электрически от тела, в результате чего мощный МОП ПТ имеет очень высокий, почти бесконечный коэффициент усиления по постоянному току.

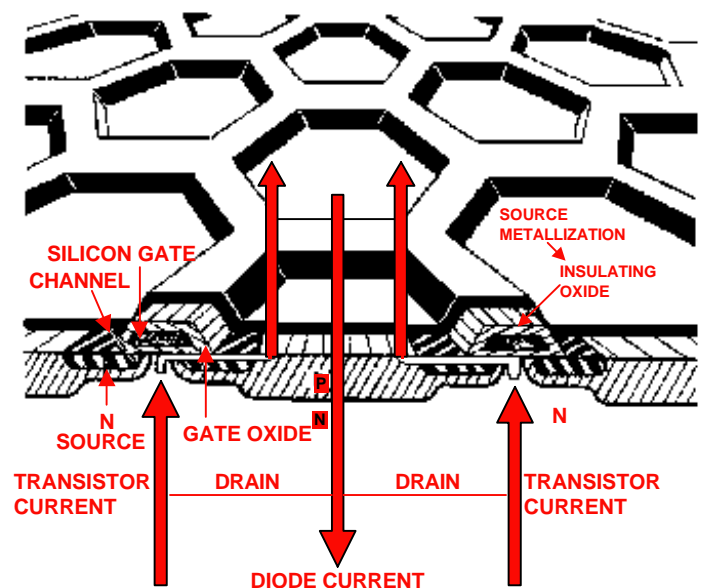
Особое свойство МОП ПТ состоит в том, что они содержат встроенный в них интегральный обратно включенный диод тело-сток. Существование этого диода объясняется рисунком 1. Когда вывод истока становится положительным по отношению к стоку, ток может протекать сквозь середину ячейки истока через прямо смещенный p-n переход. В обратном направлении мощный МОП ПТ, таким образом, ведет себя как выпрямитель на p-n переходе. Интегральный диод тело-сток является реальным элементом схемы и его токовые возможности обычно такие же, как у самого транзистора. Некоторые схемы требуют, чтобы «инверсный» диод был соединен с переключающим прибором, и в этих схемах часто бывает возможно использовать диод тело-сток МОП ПТ при условии, что предприняты необходимые меры предосторожности.

В этой статье описаны некоторые наиболее общие вопросы «что нужно делать и чего нельзя» при использовании мощных МОП ПТ. Целью является стремление помочь разработчику получить как можно больше пользы от этих замечательных приборов и одновременно снизить до минимума время обучения принципам работы.

Меры предосторожности при обращении с мощными МОП ПТ

Первым «контактом» пользователя с мощным МОП ПТ будет упаковка транзисторов, оказавшаяся на его столе. Даже на этой стадии следует быть сведущим о некоторых элементарных мерах предосторожности. Мощные ПТ, будучи МОП-приборами, могут быть потенциально повреждены статическим зарядом, когда их берут, тестируют или вставляют в схему. Проблема относительно легка по сравнению с приборами малой мощности. Мощные МОП ПТ кроме того являются мощными приборами, а будучи таковыми они имеют гораздо большую входную емкость и гораздо более способны поглощать статический заряд без создания излишнего напряжения. Однако, чтобы избежать возможных проблем в порядке хорошей практики везде, где возможно, нужно следовать нижеуказанным процедурам:

- МОП ПТ следует держать в антистатической транспортной таре или проводящей губке, или они должны быть помещены в металлические контейнеры или проводящую носимую тару, пока они не потребуются для тестирования или установки в схему.



Базовая структура МОП ПТ с гексагональной топологией

- МОП ПТ следует брать за корпус, а не за выводы.
 - При проверке электрических характеристик мощного МОП ПТ на характериографе или в тестовой схеме следует выполнять такие предосторожности:
 - в тестовых станциях должны быть проводящие полы, а коврики при столах должны быть заземлены. Такие коврики имеются в продаже;
 - вставляя МОП ПТ в характериограф или тестовую схему, не подавайте напряжение, пока все выводы не будут надежно соединены в схеме;
 - при пользовании характериографом нужно подключать резистор последовательно с затвором, чтобы гасить паразитную генерацию, которая может возникнуть в активном режиме. Достаточно величины 100 Ом;
 - при частых испытаниях удобно вставить этот резистор в контактное устройство;
 - при переключении с одного тестового диапазона на другой устанавливаемый ток и напряжение нужно снизить до нуля, чтобы избежать возникновения потенциально разрушительных выбросов напряжения при переключении диапазонов.
- Следующий шаг - включение мощного МОП ПТ в действующую схем. Следует выполнять такие простые меры предосторожности:

- рабочие станции должны использовать электрически заземленные столы и напольные маты;
- паяльники должны быть заземлены.

Теперь, когда мощный МОП ПТ включен в схему, он готов к подаче питания. Начиная с этого момента, успех в применении прибора становится делом конструкции схемы и схемных мер предосторожности, которые были предприняты, чтобы защитить МОП ПТ от непреднамеренных превышений параметров. Ниже будут приведены взаимосвязанные рассуждения о приборе и схеме применения, которые ведут к надежной безотказной работе. Остерегайтесь неожиданных выбросов напряжения затвор-исток.

Избыточное напряжение будет пробивать слой окисла затвор-исток и приводить к катастрофическому отказу. Это кажется достаточно очевидным, но не так очевидно, что превышения напряжения затвор-сток могут быть сгенерированы и что совершенно не связано с амплитудой запускающего сигнала. Проблема иллюстрируется на рисунке 2.

Если мы предположим, что импеданс Z источника запуска высокий, тогда любое изменение в положительном направлении напряжения, приложенного к выводам стока и истока (вызванное, например, переключением другого прибора в схеме), будет вызывать переходной процесс напряжения в положительном направлении на выводах затвор-исток в следующем примерном соотношении:

$$\frac{1}{1 + \frac{C_{gs}}{C_{dg}}}$$

Вышеуказанное соотношение обычно составляет величину от 1 до 6. Это означает, что изменение напряжения сток-исток на 300 В может создать переходной процесс напряжения, приближающийся к 50 В между выводами затвора и истока. На практике это «наведенное» напряжение не появится на затворе, если dv/dt положительно, так как МОП ПТ переходит в

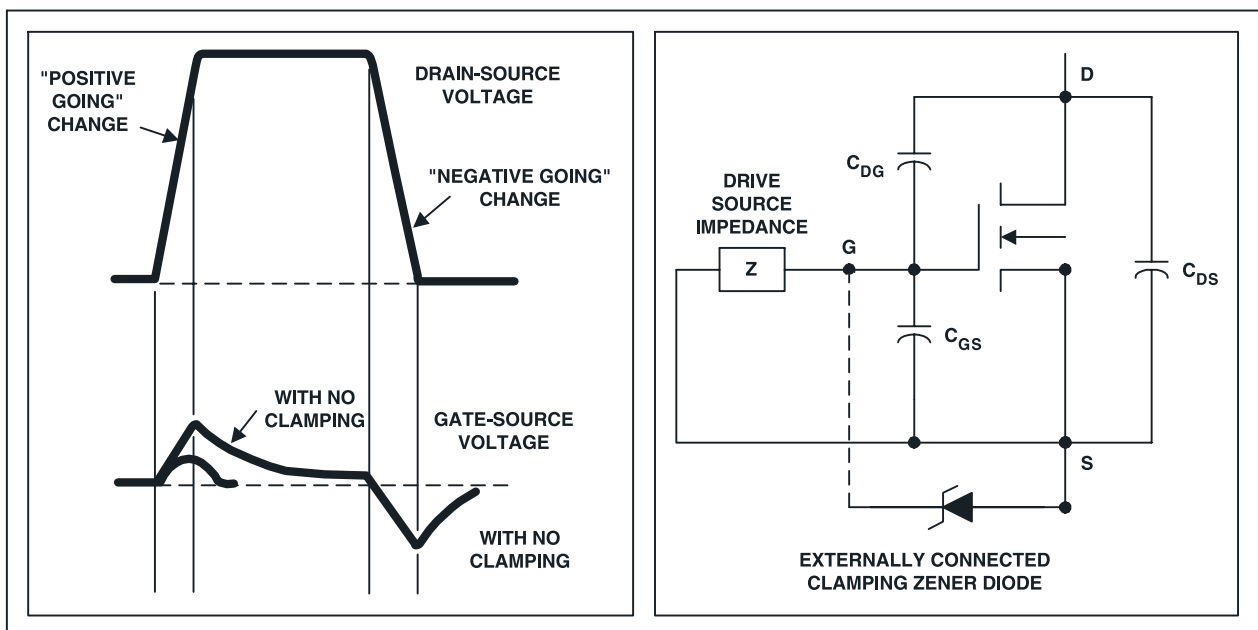


Рис. 2. Быстро изменяющееся напряжение сток-исток создает переходной процесс напряжения затвор-исток

Рис 3. Переходной процесс превышенного напряжения сток-исток, происходящий при выключении с индуктивной нагрузкой без фиксации уровня

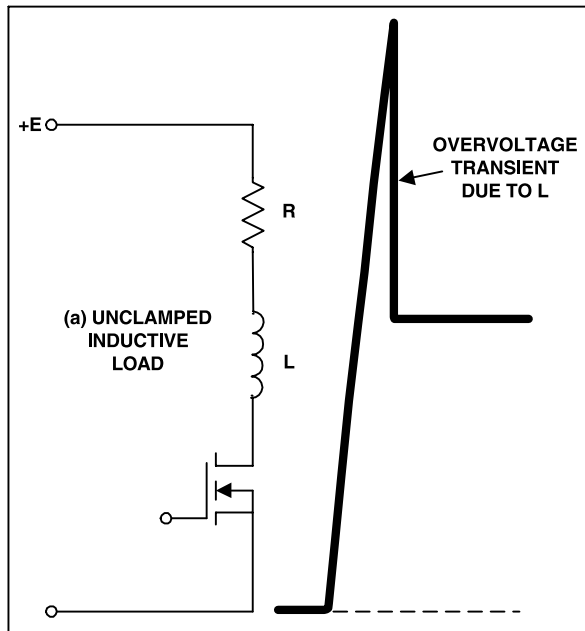


Рис. 4. Переходной процессу превышенного напряжения сток-исток, созданный индуктивностью рассеяния, происходящей при выключении индуктивной нагрузки с фиксированным уровнем

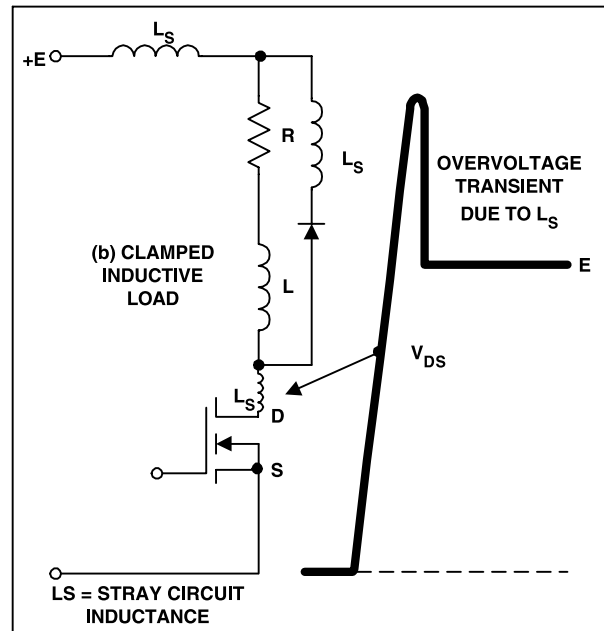


Рис. 5. Блокировка от перенапряжения с помощью стабилитрона

состояние проводимости при $V_{gs} = 4 \text{ В}$, таким образом фиксируя уровень dv/dt за счет переходного процесса тока и возросшей рассеиваемой мощности. Однако, dv/dt отрицательного направления не будет фиксироваться. Этот расчет основан на предположении худшего случая, когда переходной импеданс запускающей схемы высок по сравнению с емкостью затвор-исток МОП ПТ. Эта ситуация в действительности может быть довольно легко приближена, если схема запуска затвора содержит индуктивность, например, индуктивность изолирующего трансформатора запуска. Эта индуктивность проявляет высокий импеданс для коротких переходных процессов и эффективно отделяет затвор от его запускающей схемы на время переходного процесса.

Переходное напряжение затвор-исток отрицательного направления, появившееся при вышеуказанных обстоятельствах, может превышать допустимое напряжение затвора прибора, вызывая катастрофический отказ. Это, конечно, верно, что поскольку переходной процесс напряжения приложен в виде напряжения на затворе, которое стремится включить МОП ПТ, то общим эффектом является стремление к ограничению переходных процессов на затворе. Предотвратит ли это действие самоограничения, превышение переходным напряжением на затворе допустимых величин напряжения затвор-исток, зависит от импеданса внешней схемы. Непредсказуемое включение транзистора, конечно, само по себе является нежелательным, хотя в практических условиях кто-то может без особого желания согласиться на такую неправильность в работе схемы, при условии, что область безопасной работы прибора не будет превышена. В качестве минимального решения проблемы выводы затвор-исток должны обеспечиваться фиксацией уровня (подпором) напряжения (обычным диодом Зенера, если это удачно для этой цели), чтобы предотвратить превышение допустимых значений напряжения затвор-исток. Конечно, более солидным решением будет уменьшение импеданса схемы затвора до достаточно малого значения, чтобы не только не были превышены номиналы напряжения затвор-исток, но также переходные процессы напряжения на затворе поддерживались до уровня, на котором случайное включение не происходит.

Следует помнить, что обвальное снижение напряжения на МОП ПТ, (например, dv/dt отрицательного направления), будет создавать выброс переходного отрицательного напряжения на выводах затвор-исток. В этом случае прибор, конечно, не будет стремиться включиться, а следовательно не будет эффекта самоограничения. Диод Зенера, установленный для фиксирования уровня положительных переходных процессов, будет автоматически фиксировать уровень переходных процессов в отрицательном направлении, ограничивая их величиной падения напряжения прямой проводимости диода Зенера.

Остерегайтесь выбросов напряжения сток-исток, вызываемых переключением

Начинающий разработчик часто не придает значения тому, что могут вырабатываться собственные переходные процессы перенапряжения, когда прибор **ВЫКЛЮЧАЕТСЯ**, даже несмотря на то, что постоянное напряжение питания цепи стока существенно ниже номинальных значений V_{ds} МОП ПТ. Рисунок 3 показывает, как вырабатывается выброс напряжения, когда прибор выключается, при наличии индуктивности в схеме. Чем быстрее переключается МОП ПТ, тем больше будет перенапряжение. В практической схеме всегда присутствует какая-то индуктивность и, следовательно, всегда существует опасность появления переходных процессов перенапряжения при выключении.

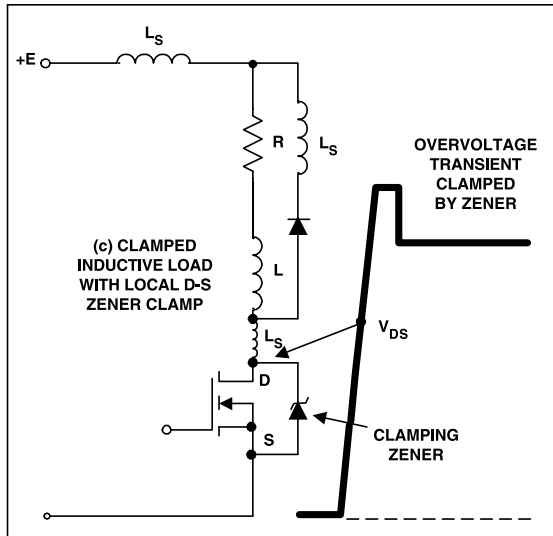


Рис. 6. Блокировка от перенапряжения с помощью демпфирующей цепочки

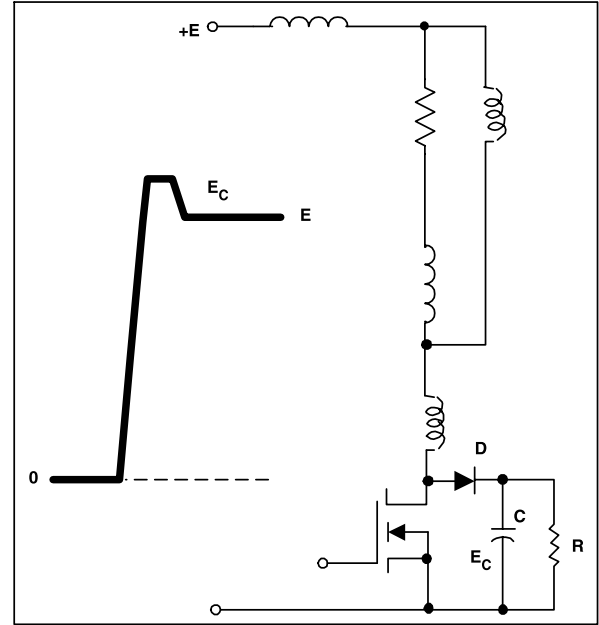


Рис. 7. Блокировка от перенапряжения с помощью сглаживающего фильтра

Конечно, как правило, основной индуктивный компонент нагрузки будет «подпираться», как показано на рис.4. Однако существует еще индуктивность рассеяния (паразитная) схемы и переходные процессы перенапряжения могут вызываться ею, не говоря уже о том, что блокирующий диод может не обеспечивать мгновенной фиксации напряжения из-за его характеристик «прямого восстановления».

Первым подходом к этой проблеме является минимизация индуктивности рассеяния схемы с помощью тщательной разводки схемы с точки зрения допустимости остаточной индуктивности схемы.

Прибор фиксации уровня должен подключаться, причем физически как можно ближе, к выводам стока и истока, как показано на рис.5. Обычный диод Зенера или блокирующий прибор хорошо подходит для этой цели. Другая схема фиксирования уровня показана на рис.6. Конденсатор С является хранящим конденсатором, который заряжается до определенного постоянного напряжения, в то время, как резистор R подобран по величине так, что рассеивает «энергию подпорки», одновременно поддерживая желаемое напряжение на конденсаторе. Диод D должен быть выбран так, чтобы его характеристика прямого восстановления не портила в сильной мере действие схемы по фиксированию уровня переходного процесса.

Можно использовать и простой RC демпфер, как показано на рис.7. Отметьте, однако, что RC демпфер не только ограничивает пик напряжения, но также снижает эффективную скорость переключения. Действуя таким образом, он поглощает энергию во время всего периода переключения, а не в конце его, как делает схема фиксации уровня напряжения. Поэтому гаситель менее эффективен, чем настоящий прибор фиксации уровня напряжения. Отметьте, что самые большие переходные процессы напряжения возникают, когда переключаются токи высокого уровня. Форма сигнала напряжения на МОП ПТ должна проверяться высокоскоростным осциллографом при полных условиях нагрузки, чтобы убедиться, что переходные процессы напряжения при переключении находятся в безопасных пределах.

Не превышайте параметры пикового тока

Все МОП ПТ имеют заданное значение максимального пикового тока. Оно установлено на уровне, который гарантирует долгосрочную надежность, и не должно превышать. Часто упускают из виду, что пиковые токи переходных процессов могут возникать в практических схемах, и они могут значительно превышать ожидаемый нормальный рабочий ток, если не предприняты достаточные меры предосторожности. Такие нагрузки, как нагреватели, осветительные приборы, двигатели, потребляют большие пусковые токи если не управляются надлежащим образом. Техника, которая гарантирует, что пиковый ток не превышает возможности МОП ПТ, должна использовать управление с помощью датчиков тока, которое выключает МОП ПТ, как только ток мгновенно достигает установленного заранее предела.

Неожиданно высокие токи переходных процессов могут также получаться, как результат обратного восстановления выпрямительного диода, когда МОП ПТ быстро включается. Это показано на рис.8. Решением является использование более быстрого выпрямительного диода или замедление переключения МОП ПТ, чтобы ограничить пиковый ток обратного восстановления выпрямительного диода.

Не работайте на средних токах, превышающих нормы

Все МОП ПТ имеют нормы максимального непрерывного прямого тока I_d . Сечение проволоки для разварки, контактные площадки, металлизация истока МОП ПТ выбираются так, чтобы выдерживать этот заданный ток непрерывно. Общий непрерывный среднеквадратичный ток, на котором работает МОП ПТ, не должен превышать норму I_d . Это означает, что при ключевом применении, например, если пиковый ток равен I_{pk} , а рабочий цикл (величина обратная) равен D , как показано на рис.9, тогда максимальное разрешенное значение $I_{pk} = I_d/D$, пока это значение меньше, чем норма $I_d(max)$.

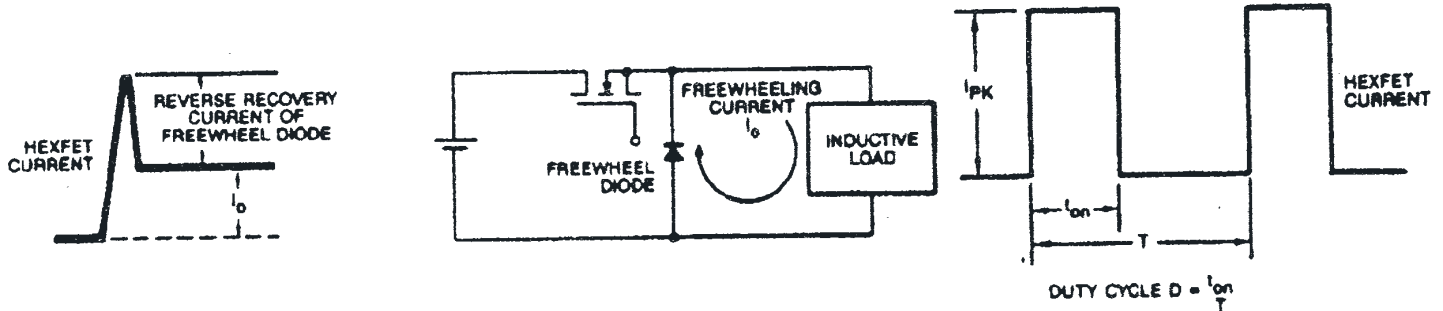


Рис. 8. Возникновение пикового тока при включении МОП ПТ

Рис. 9. Условия допустимого максимального прямого тока

Оставайтесь в температурных пределах

Мощный МОП ПТ, являясь мощным прибором, ограничен термически. Он должен устанавливаться на теплоотвод, который достаточен, чтобы удерживать температуру перехода в норме для $T_j(max)$ 150°C для условия «худшего случая» максимальной рассеиваемой мощности и максимальной температуры окружающей среды. Необходимо помнить, что в ключевом применении общая мощность состоит из потерь проводимости и потерь переключения. Время переключения и, следовательно, потери переключения полностью независимы от температуры, но потери проводимости возрастают с возрастанием температуры, т.к. возрастает с температурой $R_{ds(on)}$. Это следует принять во внимание при выборе теплоотвода. Требуемое тепловое сопротивление теплоотвода может быть рассчитано следующим образом: мощность проводимости транзистора P_T приблизительно представляется так:

$$P_T = I_T^2 R_{ds(on)} [1 + 0,007 (\Delta T_{ja} + T_a - 25)],$$

где I_T - среднеквадратичное значение тока транзистора

$R_{ds(on)}$ - сопротивление в состоянии «Вкл.» при 25°C

T_a - температура окружающей среды в °C

ΔT_{ja} - увеличение температуры «переход - окружающая среда».

Член в квадратных скобках дает обычно 0,7 % увеличения $R_{ds(on)}$ при подъеме температуры на один градус Цельсия в диапазоне свыше 25°C. Можно свериться со справочными данными конкретного прибора, чтобы более точно установить величину температурного коэффициента. Энергия переключения зависит от переключаемых напряжения и тока и типа нагрузки. Общие потери переключения P_s равны общей энергии переключения E_t , умноженной на частоту переключения f . E_t - это сумма энергий отдельных переключений, имеющих место в каждом основном рабочем цикле.

$$P_s = E_t \times f$$

Общая мощность рассеивания является суммой мощности проводимости P_T и мощности переключения P_s .

$$P = P_T + P_s = I_T^2 R_{ds(on)} [1 + 0,007(\Delta T_{ja} + T_a - 25)] + P_s$$

Так как:

$$\Delta T_{ja} = P \times R_{ja},$$

где R_{ja} - тепловое сопротивление «переход-окружающая среда»,

то требуемое значение R_{ja} для заданной величины ΔT_{ja} равно:

$$R_{ja} = \frac{\Delta T_{ja}}{I_T^2 R_{ds(on)} [1 + 0,007(\Delta T_{ja} + T_a - 25)] + P_s}$$

Тепловое сопротивление «переход-окружающая среда» R_{ja} состоит из внутреннего теплового сопротивления «переход-корпус» R_{jc} плюс тепловое сопротивление «корпус-теплоотвод» R_{es} , плюс тепловое сопротивление «теплоотвод-окружающая среда» R_{sa} . Первые два слагаемых определяются прибором, и требуемое тепловое сопротивление теплоотвода R_{sa} для заданного увеличения температуры перехода ΔT_j -а можно рассчитать так:

$$R_{s-a} = R_{j-a} - (R_{jc} + R_{c-s})$$

Уделяйте внимание топологии схемы

Индуктивность в схеме может вызвать переходные процессы перенапряжения, замедляющие скорость переключения, непредвиденный дисбаланс тока между параллельно соединенными приборами и нежелательные осцилляции.

Чтобы минимизировать эти эффекты, нужно минимизировать паразитную индуктивность. Это делается путем сокращения длины проводящих дорожек, минимизацией областей токовых петель, используя сведенные пары выводов и полосковую конструкцию заземления. Локальное размещение конденсаторов облегчает воздействие любых остаточных индуктивностей схемы, когда эти меры приняты.

Топология схемы должна быть как можно более симметрична, чтобы поддерживать сбалансированные токи в параллельно соединенных МОП ПТ. Затворы параллельно соединенных приборов должны быть разделены маленькими ферритовыми шайбами, помещенными над подключением к затворам или отдельными резисторами, включенными последовательно с каждым затвором. Эти меры предотвращают паразитные осцилляции.

Будьте осторожны при использовании интегрального диода тело-сток

Интегральный диод тело-сток МОП ПТ обладает эффектом восстановления неосновных носителей. Обратное восстановление представляет потенциальную проблему, когда выключается любой выпрямительный диод, чем медленнее диод, тем больше проблема. Выпрямительный диод МОП ПТ относительно быстрый - не такой быстрый, как имеющиеся самые скоростные дискретные выпрямительные диоды, но значительно быстрее, чем обычные выпрямительные диоды общего назначения. По сравнению с самим МОП ПТ, с другой стороны, скорость переключения интегрального обратно включенного выпрямительного диода довольно медленная. Скорость переключения схемы, которая использует диод тело-сток МОП ПТ, может поэтому быть ограничена выпрямительным диодом. Так или иначе это будет зависеть от схемы и рабочих условий. Наиболее общие применения МОП ПТ, в которых скорость переключения и, следовательно, частота будут потенциально ограничены выпрямительным диодом - это преобразователи постоянного напряжения в постоянное и инверторы для регулируемых источников питания, блоков управления электродвигателями и т.п., в которых используются «многократные» импульсы напряжения. К счастью, эти применения в основном не требуют сверхбыстрого переключения, и поэтому их может устроить характеристика обратного восстановления выпрямительного диода.

Независимо от общей конфигурации схемы или конкретного применения ситуация работы схемы, которая приводит к отказам, происходит, когда ток обратной связи от индуктивной нагрузки коммутируется от интегрального выпрямительного диода МОП ПТ на транзистор «противоположного» уровня, два прибора формируют тандем последовательно соединенной пары на источник напряжения с низким импедансом, как показано на рис.10. Эта схемная конфигурация случается во многих системах преобразователей и инверторов.

Если принимающий сигнал МОП ПТ включается слишком быстро, то пиковый ток обратного восстановления интегрального диода тело-сток «противоположного» МОП ПТ будет увеличиваться слишком быстро, норма пикового тока обратного восстановления будет превышена и прибор может выйти из строя.

Пиковый ток обратного восстановления выпрямительного диода может быть снижен уменьшением скорости изменения тока во время процесса коммутации. Скорость изменения тока может управляться специальным замедлением скорости нарастания импульса запуска затвора. Используя эту технику, пиковый ток может быть снижен до почти любой желаемой величины за счет удлинения времени переключения и большего рассеивания. Осциллограммы на рис.11 показывают этот эффект. Замедлением общего времени включения с 300 нсек до 1,8 мсек пиковый ток транзистора IRF330 был снижен от 20 А до 10 А. Энергия рассеивания, связанная с «неограниченным» включением на рис.11а, составляет 0,9 мДж, в то время как она равна 2,7 мДж для управляемого включения на рис. 11б.

Отметьте, однако, что средние потери переключения при частоте переключения, скажем 5 кГц, достаточно управляемые - 4,5 Вт и 13,5 Вт для рисунков 11а и 11б соответственно. Отметьте также, что нет необходимости замедлять выключение МОП ПТ, следовательно энергия рассеивания выключения будет относительно мала по сравнению с включением. При работе на частотах несколько кГц, где сверхбыстрое переключение не нужно, замедление подаваемого сигнала запуска затвора для снижения пикового тока обратного восстановления «противоположного» выпрямительного диода представляет хорошее практическое решение.

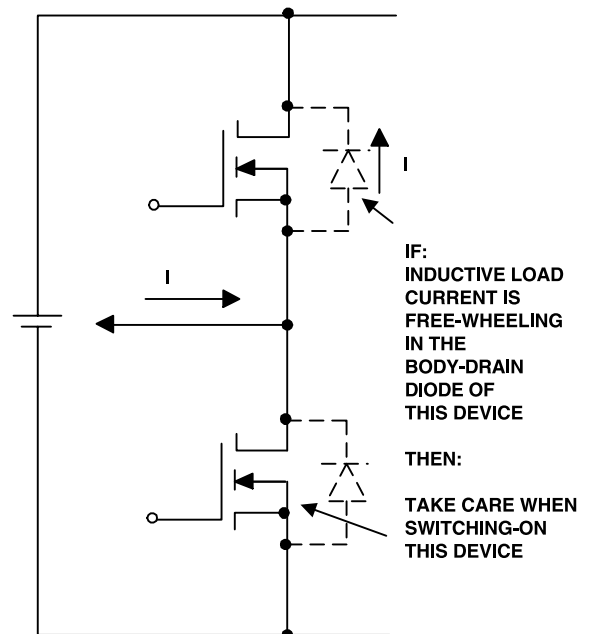


Рис. 10. Схема с применением интегрального встроенного диода

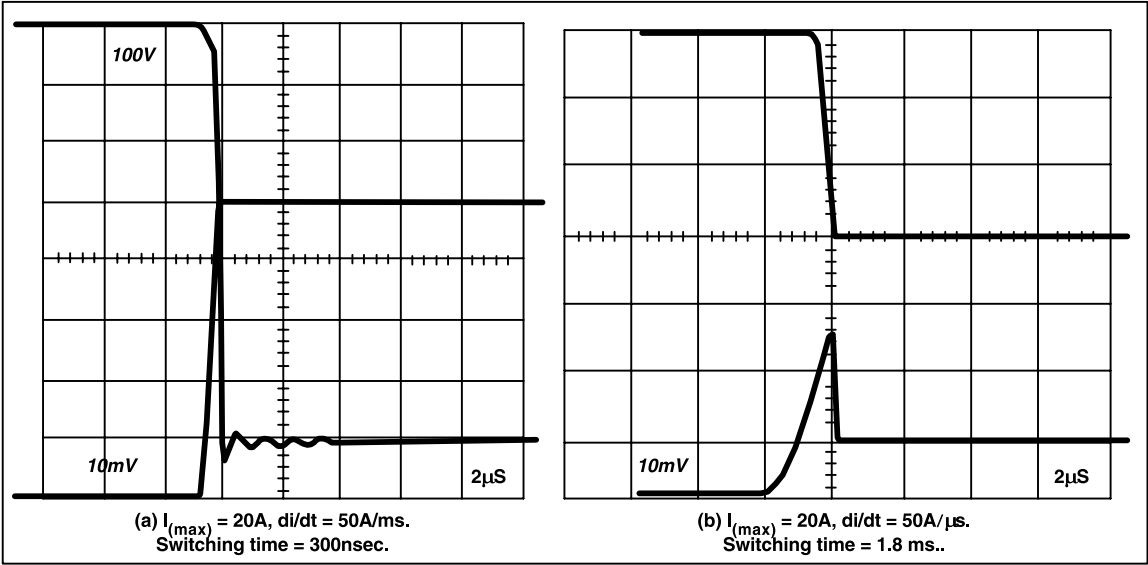


Рис. 11. Осциллограммы переключения транзистора IRF330 в обратно включенный выпрямительный диод другого IRF330 с током обратной связи 4 A,

Верхний луч - напряжение 110 В/деление.
Нижний луч - ток 4 А/деление.
Время • 2 мксек/деление.

Будьте внимательны при сравнении норм токов

Пользователя можно простить, если он считает, что норма непрерывного тока стока I_d , имеющаяся в справочных данных, представляет ток, при котором прибор может действительно работать непрерывно в практической системе.

Многие изготовители присваивают такую норму «непрерывного» тока прибору, которая в практических условиях не может быть использована, потому что получающаяся мощность рассеивания проводимости будет так велика, что потребует теплоотвод с нереально низким тепловым сопротивлением или нереально низкой температурой окружающей среды.

Таблица 1 является иллюстрацией отсутствия в настоящее время стандартизации норм на токи разных производителей МОП ПТ. Видно, что приборы с большим сопротивлением в состоянии «Вкл.» имеют в основном большие нормы токов, чем приборы с более низким сопротивлением - это пародия на «правильную» ситуацию, которая должна и будет существовать, если все типы приборов с заданным размером кристалла и тепловым сопротивлением переход-корпус оценивать на основе заданной мощности рассеивания.

Таблица 1. Сравнение характеристик различных МОП ПТ

Device Type	$R_{D(on)}$ Ohms	I_D Amps	$R\theta_j=C$ °C/W	Calculated $T_{C(max)}$	Applicable to I_D
IRF-330	1.0	4	1.67	90	
MTP565	1.5	5	1.67	25	
HPWR6504	1.0	5	1.39	80	
VN4001A	1.5	8		<25	
VN0340B1	1.5	8		<25	

Наилучшим советом пользователю будет - сравнивайте различные типы приборов по сопротивлению во включенном состоянии, а не по норме I_d . К счастью, все производители дают $R_{ds(on)}$ при 25°C и это обеспечивает общую базу для сравнения. Этот параметр, взятый совместно с тепловым сопротивлением переход-корпус (которое, к сожалению, не все производители дают) является наилучшим показателем истинных токовых возможностей МОП ПТ.

Выводы

Мощные МОП ПТ имеют много преимуществ. При правильном применении они улучшают всю конструкцию системы, которая часто содержит меньше компонентов, легче, компактнее и имеет лучшие характеристики, чем те, которые могут быть достигнуты на приборах другого типа.

Так же, как и все мощные полупроводниковые приборы, мощные МОП ПТ имеют свои собственные маленькие технические тонкости. Если эти тонкости правильно понять, потенциальные ловушки могут быть легко преодолены при минимальных издержках и потенциально больших достижениях.