

НОВЫЙ ФАКТОР ЗАРЯДА ЗАТВОРА МОЩНЫХ МОП ПТ ПРИВОДИТ К ПРОСТОЙ СХЕМЕ ЗАПУСКА

B. R. PELLY

AN-944A

Разработчики, не знакомые с характеристиками МОП ПТ, начинают разработку схемы запуска с определения параметров компонентов, основываясь на емкости затвор-исток или входной емкости, приводимой в справочных данных. Несмотря на то, что параметры RC, получаемые таким образом, служат в качестве исходной точки в разработке, они могут рассматриваться только как исходные данные первого порядка.

Если разработчик хочет использовать МОП ПТ для переключения за 100 наносекунд, то, чтобы обеспечить приемлемую теоретическую постоянную времени, определяет значение RC, основанное на емкости затвор-исток. Величина RC не решает проблему полностью, потому что емкость затвор-сток также должна приниматься во внимание при расчете времени заряда.

Хотя емкость затвор-исток является важной величиной, реально емкость затвор-сток более важна - и более сложна в обращении, так как она представляет собой нелинейную емкость, действующую как функция напряжения; емкость затвор-исток также действует как функция напряжения, но в значительно меньшей степени. Функция емкости затвор-сток подобна той, что была обнаружена в ламповых усилителях.

Эффект емкости затвор-сток подобен эффекту «Миллера», явлению, благодаря которому путь обратной связи между входом и выходом электронного прибора обеспечивается межэлектродной емкостью. Это оказывает влияние на уровень входного сигнала прибора, которое выражается в том, что полная динамическая входная емкость больше, чем сумма статических емкостей электродов. Явление воздействия импеданса анода и усиления по напряжению на уровень входного сигнала было впервые изучено в схемах усилителей на ламповом триоде Джоном М.Миллером.

А именно, на высоких частотах, когда емкость сетка-анод (затвор-исток) не является пренебрежимой, входная емкость прибора является функцией усиления по напряжению.

Решение эффекта «Миллера» не является точной моделью процесса даже для ламп, где эти процессы гораздо сложнее, чем в случае МОП ПТ. В действительности, емкость затвор-сток, будучи по статической величине меньше, чем емкость затвор-исток, подвергается воздействию напряжения и часто бывает более чем в 20 раз большей, чем емкость затвор-исток. Следовательно, емкость затвор-сток, или емкость «Миллера», обычно требует большего заряда, чем входная емкость.

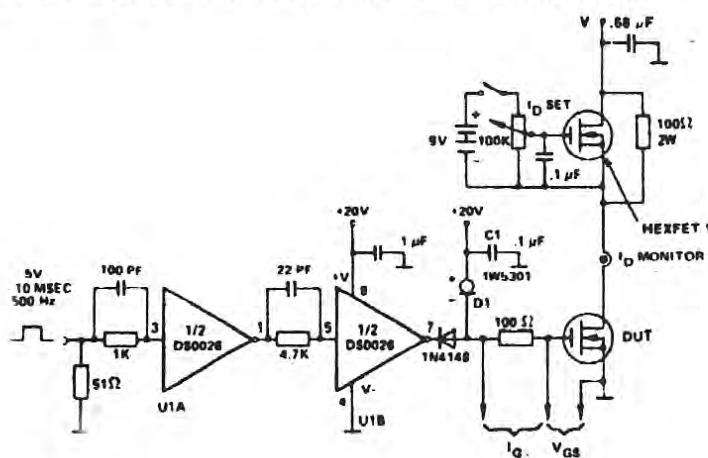


Рис. 1. Схема измерения заряда затвора МОП ПТ

Чтобы учесть обе емкости (затвор-исток и затвор-сток) и дать их разработчикам готовыми к использованию, каждый МОП ПТ, выпускаемый фирмой International Rectifier, испытывается на соответствие параметру спецификации, называемому «заряд затвора», который может использоваться для расчета схемы запуска.

Типовая схема испытаний, которая может использоваться для измерения заряда затвора, показана на рис.1. В этой схеме на затвор испытываемого прибора от конденсатора 0.1 мкФ C1 через стабилизирующий диод D1 подается приблизительно постоянный ток. Постоянный ток в схеме стока устанавливает-

ся напряжением на затворе МОП ПТ1, так что чистое измерение заряда, потребляемого затвором, связано с заданным током и напряжением исток - сток.

Осциллограмма напряжения затвор-исток во время тестирования, показанная на рис.2, связывает напряжение затвора с временем. Так как на затвор подается постоянный ток, горизонтальная шкала времени прямо пропорциональна заряду, подаваемому на затвор. Следовательно, при наличии подходящего коэффициента шкалы эта осциллограмма является графиком зависимости напряжения затвора от заряда.

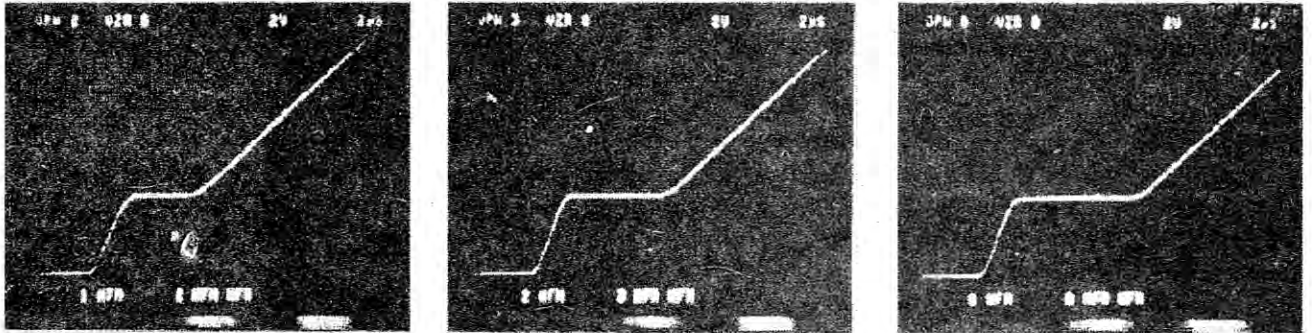


Рис. 2. Форма сигналов заряда затвора при различном напряжении на стоке (МОП ПТ IRF 130: $I_G = 1,5\text{mA}$, $I_D = 1\text{A}$, $V_{DS} = 10, 40$ и 80V)

Точка второго подъема напряжения на осциллограмме указывает место, где прибор включается полностью. В течение первого подъема напряжения заряжается емкость затвор-исток, а в течение горизонтального участка заряжается емкость затвор-сток. Поэтому эта осциллограмма дает ясное различие между зарядами, требуемыми для емкостей затвор-исток и затвор-сток (емкости «Миллера»). При втором подъеме напряжения обе емкости заряжаются до величины, необходимой для переключения данного напряжения и тока. Более детальное объяснение этих данных дается далее.

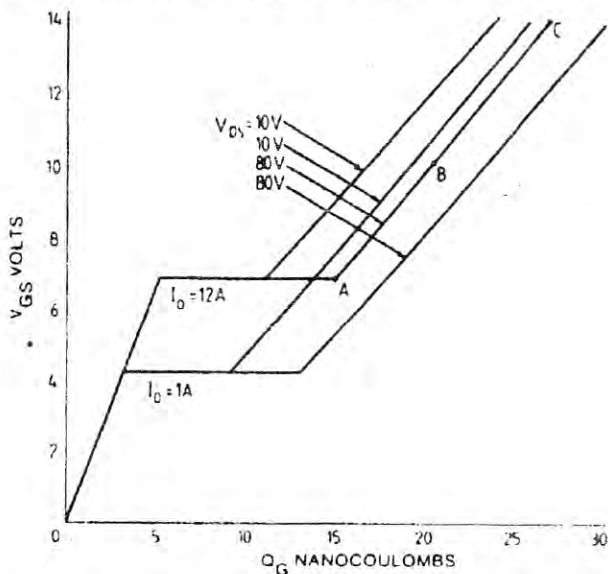


Рис. 3. Зависимость напряжения на затворе от заряда затвора для МОП ПТ IRF 130

График на рис. 3 представляет зависимость напряжения затвора от заряда затвора в наносекундах для IRF130. Хотя второй подъем напряжения указывает точку, в которой процесс переключения завершается, нормы запаса разработки по напряжению требуют больший уровень запускающего напряжения, подаваемого на затвор, чем тот, который необходим для переключения заданного напряжения и тока стока. Следовательно, общий заряд, потребляемый затвором, на практике выше, чем минимально необходимый. Например, заряд затвора, требуемый для переключения 12А, при 80В равен 15 нКул (точка А), а соответствующее напряжение затвора равно примерно 7В. Если подаваемое запускающее напряжение имеет амплитуду 10В (т.е. запас 3В), тогда полный заряд затвора, который потребляется в действительности, будет около 20 нКул (точка В).

Как показано на графике, переключается ли 10В или 80В в цепи стока, разница в необходимом заряде затвора не пропорциональна. Это происходит из-за того, что емкость «Миллера» является нелинейной функцией напряжения и уменьшается с возрастанием напряжения.

Важность данных о заряде затвора для разработчика иллюстрируется следующим образом.

В предыдущем примере для переключения напряжения стока 80В и тока стока 12А требуется заряд затвора около 15 нКул. Так как заряд затвора 15 нКул является произведением входного тока затвора на время переключения, то, если на затвор подается 1.5

А, прибор переключается за 10 нсек. Отсюда следует, что если на затвор будет подано 15 мА, тогда переключение произойдет за 1 мсек и т.д.

Эти простые вычисления наглядно говорят разработчику о взаимосвязи между количеством тока, которое можно получить от схемы запуска, и временем переключения, которое может быть достигнуто. При известном заряде затвора разработчик может разработать схему запуска, соответствующую требуемому времени переключения.

Рассмотрим типовой практический пример переключающей схемы на 100 кГц, в которой требуется достичь времени переключения, равного 100 наносекунд. Требуемый ток запуска затвора определяется простым временем заряда затвора 15×10^9 , на требуемое время переключения 100×10^9 , что дает 150 мА. Из этого вычисления разработчик может дальше прийти к импедансу схемы запуска. Если схема запуска подает, например, 14В на затвор, тогда потребуется импеданс схемы запуска около 50 Ом. Обратите внимание, что в течение «горизонтальной» части периода переключения (рис.3) напряжение затвора постоянно и составляет около 7В. Разница между подаваемым напряжением 14В и напряжением затвора 7В объясняется необходимостью получения требуемого тока, через сопротивление схемы запуска.

Данные заряда затвора также позволяют разработчику быстро определить среднюю мощность запуска затвора. Средняя мощность запуска затвора $P_{drive} = Q_g V_{gf}$. Взяв в качестве примера вышеупомянутую схему переключения на 100 кГц и предположив напряжение запуска затвора $V_g = 14В$, а соответствующую величину заряда затвора $Q_g = 27$ нКул (точка С на рис.3), имеем среднюю мощность запуска $27 \times 10^9 \times 14 \times 10^5 = 0.038Вт$. Даже если ток запуска 150 мА во время интервала переключения может казаться относительно высоким, средняя мощность будет мизерной (0.004%) в сравнении с мощностью, переключаемой в цепи стока. Это происходит из-за того, что ток запуска протекает в течение такого короткого периода времени так, что средняя мощность является пренебрежимо малой.

Таким образом, действительная мощность запуска для МОП ПТ мала по сравнению с аналогичной мощностью биполярного транзистора, который должен поддерживать ток переключения в течение всего включенного состояния. Конечно, средняя мощность запуска возрастает при более высоких частотах, но даже при 5 МГц она будет составлять только 1.9Вт.

Кривая заряда затвора

На осциллограммах напряжения затвор-исток, приведенных на рис.2, наглядно видны области между зарядом, требуемым для емкости затвор-исток, и зарядом, требуемым для емкости затвор-сток, или емкости «Миллера». Прилагаемая упрощенная схема измерения и диаграммы сигналов (рис.4 и рис. 5 соответственно) дают объяснение.

До момента времени t_0 ключ S замкнут; испытуемый прибор поддерживает полное напряжение схемы V_{dd} , а напряжение затвора и ток стока равны нулю. В момент t_0 ключ S размыкается, емкость затвор-исток начинает заряжаться и напряжение затвор-исток увеличивается. Ток не протекает в стоке, пока напряжение затвора не достигает «порогового» напряжения.

В течение интервала от t_1 до t_2 емкость затвор-исток продолжает заряжаться и ток стока растет пропорционально. Пока действительный ток стока увеличивается до значения, I_d , инерционный выпрямительный диод остается в состоянии проводимости, напряжение на нем остается низким, а напряжение на измеряемом транзисторе продолжает быть примерно равным полному напряжению схемы V_{dd} . Верхняя обкладка емкости сток-затвор C_{gd} поэтому остается при фиксированном потенциале, в то время как потенциал нижней обкладки изменяется вместе с потенциалом затвора. Зарядный ток, принимаемый емкостью C_{gd} в течение этого периода, мал и в практических целях им можно пренебречь, т.е. C_{gd} по величине мала по сравнению с C_{gs} .

В момент времени t_2 ток стока достигает величины I_d и инерционный диод выключается; потенциал стока теперь уже не определяется напряжением питания V_{dd} . Ток стока теперь остается постоянным, равным I_d , поддерживаемым схемой в то время, как напряжение стока начинает падать. Так как напряжение затвора имеет сложную связь с током стока

через внутреннюю передаточную характеристику испытуемого прибора (пока он остается работать в «активной» области), то напряжение затвора устанавливается постоянным из-за того, что «поддерживаемый» ток стока постоянен. Следовательно, в это время не происходит никакого потребления заряда емкостью затвор-исток, потому что напряжение затвора остается постоянным. Таким образом, теперь ток запуска отводится полностью в емкость «Миллера» C_{gd} , и заряд схемы запуска теперь исключительно приходится на разрядку емкости «Миллера».

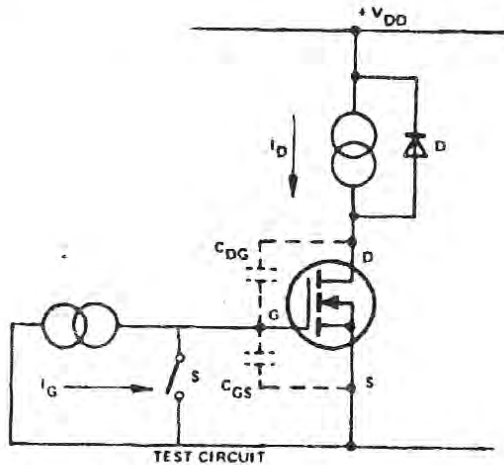


Рис.4. Базовая схема измерения заряда затвора

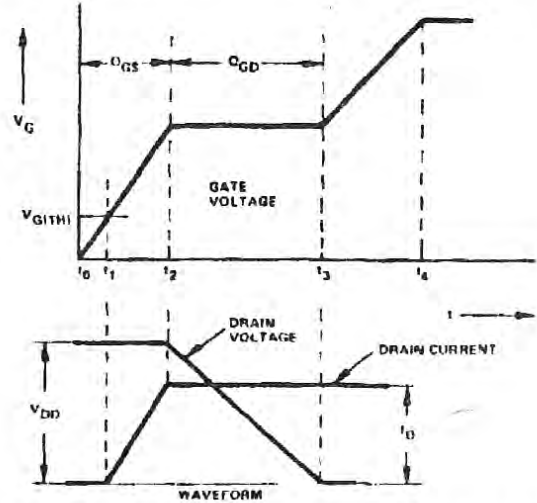


Рис.5. Общая форма сигналов при заряде затвора

Изменение напряжения стока в течение периода времени от t_2 до t_3 относительно велико и, следовательно, полный заряд запуска обычно бывает больше для емкости «Миллера» C_{gd} , чем емкости затвор-исток C_{gs} . В момент времени t_3 напряжение стока падает до величины, равной $I_d \times R_{ds(on)}$, и испытуемый прибор теперь выходит из «активной» области (в терминологии биполярных транзисторов он достигает «насыщения»). Теперь напряжение затвора больше не сдерживается переходной характеристикой прибора в отношении тока стока и может свободно увеличиваться. Это происходит до момента времени t_4 , когда напряжение затвора становится равным напряжению, «поддерживающему» источник тока схемы затвора.

Шкала времени осциллограммы напряжения затвор-исток прямо пропорциональна заряду, доставляемому схемой запуска, потому что заряд равен произведению тока на время, а ток остается постоянным в течение всей последовательности событий. Таким образом, длительность периода времени от t_0 до t_1 представляет заряд Q_{gs} , потребляемый емкостью затвор-исток, в то время как длительность периода от t_2 до t_3 представляет заряд, потребляемый емкостью затвор-сток, или емкостью «Миллера». Полный заряд в момент времени t_3 - это заряд, требуемый для переключения заданного напряжения V_{dd} и тока I_d .

Дополнительный заряд, потребляемый после времени t_3 , не представляет «переключающий» заряд; это просто избыточный заряд, который будет доставляться схемой запуска, так как амплитуда подаваемого напряжения запуска затвора обычно бывает выше (что является хорошей практикой разработчиков) минимума, требуемого для завершения переключения.

Осторожность, необходимая при сравнении разной продукции

Изготовители иногда делают технические сообщения о своей продукции, которые выглядят правдоподобными, но которые в действительности не выдерживают практической проверки.

Это относится к вопросу, связанному с входной емкостью силового МОП ПТ. Такие заявления, как «входная емкость прибора Y меньше, чем у прибора X, поэтому Y переключается быстрее, чем X», часто бывают верными, но также часто оказываются ошибочными.

Не принимая во внимание очевидную ошибочность многих заявлений, таких например, что «большие кристаллы имеют большую собственную емкость, чем меньшие» - обычно из рассмотрения выпадают более важные фундаментальные принципы.

Как показывает эта статья, важностью «первого порядка» является полный заряд затвора, требуемый для переключения. Чем меньше заряд, тем меньший ток запуска затвора необходим для достижения данного времени переключения.

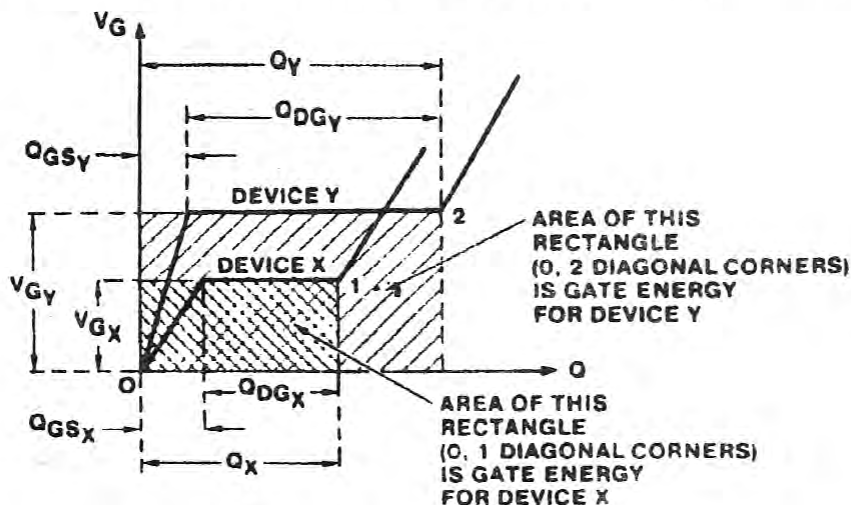


Рис.6. Сравнение характеристик заряда затвора различных типов приборов

Общее сравнение двух гипотетических МОП ПТ типа «X» и «Y» иллюстрируется на рис.6. Прибор X имеет более высокую входную емкость, следовательно, начальный наклон характеристики его заряда затвора меньше, чем у прибора Y. Однако, Q_{GS} у прибора X почти такой же, как у прибора Y, потому что он имеет более высокую проводимость и поэтому требует меньшего напряжения на своем затворе для данной величины тока запуска (V_{Gx} меньше V_{Gy}). Заряд «Миллера», потребляемый прибором X, следовательно, меньше, чем заряд, потребляемый прибором Y. В результате, полный заряд, требуемый для переключения прибора X, Q_X оказывается существенно меньше, чем заряд Q_Y , требуемый для переключения прибора Y.

Если бы сравнение этих приборов X и Y было сделано поверхностно, только на базе входных емкостей, то было бы сделано ошибочное заключение, что Y «лучше», чем X.

Другим соображением является энергия, требуемая для переключения. Опять прибор X является в выигрыше в этом примере по сравнению с Y. Энергия - это произведение заряда затвора на напряжение затвора и представляется площадью прямоугольника, угол которого лежит в «точке переключения» (точка 1 для прибора X и точка 2 для прибора Y). Очевидно, что X требует существенно меньшей энергии, чем Y.

Подведем итоги: опасайтесь поверхностных сравнений. Проверьте все факты перед принятием решения, какой МОП ПТ действительно оптимален по характеристикам переключения.