

Кирилл Иванов (г. Челябинск)

КАК РАЗРАБОТЧИКУ ЗАСТАВИТЬ РАБОТАТЬ НОВЫЕ MOSFETS



В практике разработчика электроники встречаются ситуации, когда новое изделие, призванное заменить в схеме старое, не работает или работает в нежелательном режиме. Почему это происходит, и как избежать этого в отношении транзисторов MOSFET (на примере изделий International Rectifier) рассказывает данная статья.

МOSFET были разработаны более 40 лет назад и некоторые особенности этих устройств до сих пор не получили достойного внимания.

Приходилось ли вам наблюдать за переходом напряжения VDS в режим «ON», в то время как напряжение VGS находилось в состоянии «OFF»? Может быть, вы использовали MOSFET в линейном режиме и он не работал, несмотря на то, что находился в безопасной области работы (SOA)? Сталкивались ли с тем, что новые, более выгодные по цене приборы с похожими параметрами не работали, когда вы заменяли ими старые?

В этой статье хотелось бы углубиться в эти вопросы, исследуя нюансы механизмов динамического включения MOSFET, а также механизмы обратного восстановления диода, лавинного пробоя, особенности работы в линейном режиме.

Из статьи станет понятно, как выбрать правильное устройство и максимально избежать проблем.

Азбука устройства MOSFET

В общих чертах MOSFET позволяет с помощью низкого напряжения на затворе управлять током, протекающим по каналу «исток-сток». Благодаря этому свойству можно значительно упростить схему управления, а также снизить суммарную затрачиваемую на управление мощность.

На сегодняшний день широкое распространение получили две технологии производства MOSFET: планарная и Trench.

Первые MOSFET были созданы по планарной технологии. Транзисторы, изготавливаемые по этой технологии,

изображены на рис. 1. Их структура состоит из металла и полупроводника, разделенных слоем оксида кремния SiO_2 .

Trench-структура (рис. 2) имеет более высокую плотность ячеек, что выражается в более низком значении $R_{ds(on)}$. В Trench MOSFET на поверхности подложки создается V-образная канавка, на которую осаждается слой оксида, и затем происходит металлизация.

Поле затвора в Trench MOSFET оказывает влияние на гораздо большую область кремния. В результате этого для получения аналогичного $R_{ds(on)}$ требуются меньшие физические размеры, чем при изготовлении MOSFET по планарной технологии.

Наряду с явными достоинствами MOSFET имеют и отрицательные стороны. Так, между слоем n- стока и p+ истока формируется внутренний диод.

Характеристики этого диода приводятся в технических данных на все MOSFET. Применяя MOSFET в импульсных схемах, всегда нужно принимать во внимание время обратного восстановления внутреннего диода. Также, в MOSFET формируется внутренний NPN-транзистор, коллектором которого является n-слой стока, базой — p-слой, а эмиттером — n-слой истока.

Необходимо учитывать, что металлизация истока (рис. 3) в некоторых местах имеет очень низкое сопротивление между переходом «база-эмиттер», этот момент осложняет включение транзистора.

Емкостные механизмы ложного открывания

Несколько ложных механизмов включения могут создавать сложности при разработке импульсного источника питания. Открывают список два из них. Они связаны с паразитными емкостями транзистора и переходными процессами. Переходные процессы возникают из-за изменения напряжения на индуктивности. Происходит это во время переключения состояния MOSFET.

Первый механизм связан с емкостью Миллера C_{DG} и емкостью затвора C_{GS} .

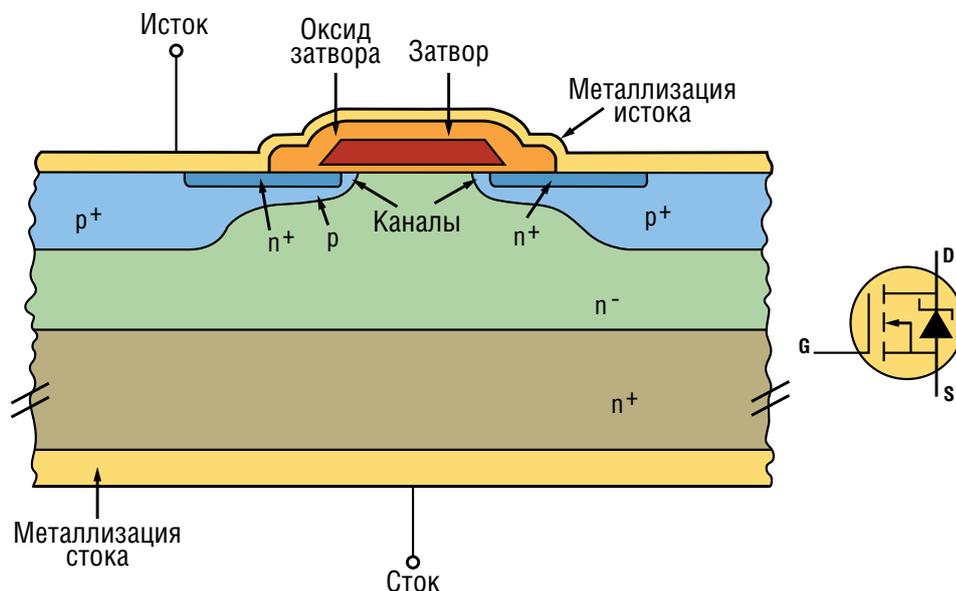


Рис. 1. Планарная технология – первые дискретные MOSFET

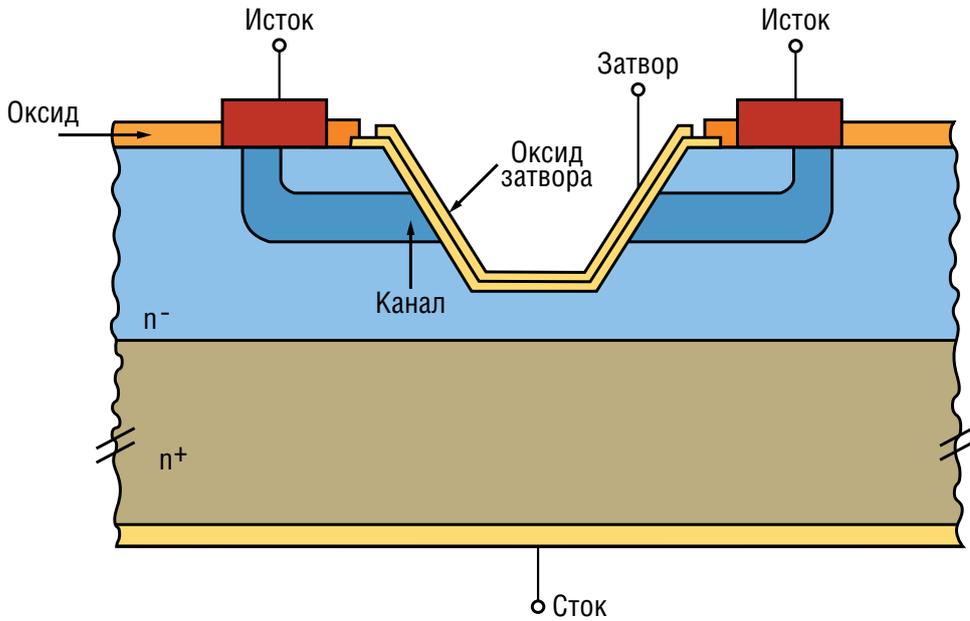


Рис. 2. Высокоточные Trench MOSFET могут быть меньше, чем их планарные собратья, но обладать сравнимым значением $R_{ds(on)}$

Если к выключенному MOSFET приложить напряжение V_{DS} , то фронт этого напряжения наводит ток, протекающий через емкость Миллера, емкость затвора (R_G) создается падение напряжения (рис. 4). Если образующийся потенциал превысит пороговое напряжение затвора, произойдет ложное открывание транзистора.

С ростом температуры увеличивается вероятность ложного открывания транзистора из-за тока, наведенного фронтом напряжения V_{DS} .

Данная проблема актуальна, когда синхронный понижающий конвертер преобразует напряжение с 12 до 1,8 В или ниже, а выход продолжительное время нагружен на индуктивную нагрузку. В этом случае ключ нижнего плеча проводит ток нагрузки большую часть времени. Когда ключ верхнего плеча запирается, индуктивность коммутируется вниз через внутренний диод транзистора нижнего плеча, затем транзистор нижнего плеча включается. На-

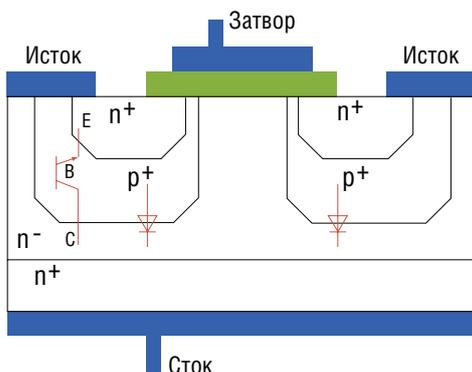


Рис. 3. Внутренний диод и биполярный транзистор в структуре MOSFET

пряжение «сток-исток» верхнего ключа быстро поднимается от 0 В (включенное состояние) до примерно $V_{CC}-V_F$ (выключенное состояние минус напряжение падения на диоде). В это время транзистор весьма восприимчив к ложному отпираанию. Вероятность этого настолько высока, что для качественной оценки используется соотношение Q_{GS} и Q_{GD} ; выбирая MOSFET, мы должны руководствоваться этим соотношением. Чем выше Q_{GD} и ниже Q_{GS} , тем выше вероятность, что произойдет ложное открывание. Низкое значение R_G , низкий выходной импеданс драйвера затвора и низкий импеданс трассировки позволяют качественнее удерживать устройство в запертом состоянии.

Если в устройстве имеются подозрения на ложные открывания, наблюдайте за напряжениями V_{GS} , V_{DS} и током I_D . Когда нижний ключ отпирается, мы наблюдаем короткий положительный импульс на V_{GS} и связанное с ним понижение V_{DS} . Для борьбы с этим эффектом можно выбрать MOSFET с

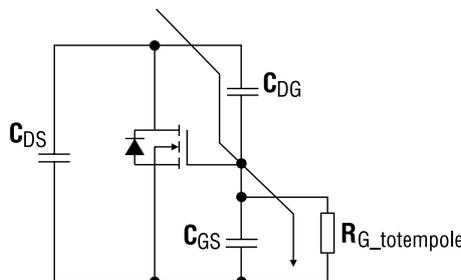


Рис. 4. Емкость Миллера с емкостью затвор-исток образуют делитель напряжения

низкой емкостью C_{DG} , высокой емкостью C_{GS} и более высоким порогом отпираания. Возможна установка дополнительного конденсатора между затвором и истоком. При установке C_{GS} увеличивается суммарный заряд затвора, необходимый для достижения порогового напряжения отпираания MOSFET. Емкость C_{GS} ослабляет влияние эффекта Миллера, заряжаясь создаваемым им током и препятствуя возникновению тока в цепи затвора. Однако этот способ очень редко используется на практике, поскольку увеличение емкости в цепи затвора приводит к росту потерь переключения MOSFET.

Второй емкостной механизм связан с внутренним NPN-транзистором, сформированным в структуре MOSFET. Переход «база-эмиттер» этого транзистора обладает низким, но не нулевым сопротивлением. Падение напряжения, вызванное протеканием тока по этому сопротивлению, заряжает емкость Миллера (рис. 5)

Включение от индуктивности истока

Структуры большинства выводных MOSFET — SOIC, DPAK, TO-220 и т.д. — сходны между собой. Высокотемпературный припой соединяет основные устройства с выводной рамкой. Это соединение обладает минимальной проводимостью. Также жесткие проволочки соединяют исток прибора от наружного вывода к внутреннему слою. Иногда от вывода истока идет несколько жестких параллельных проволочек, для этого используется технология соединения die-to-leadframe (рис. 6).

Затвор соединен с внешним выводом одним миниатюрным жестким проводником. Проблемы возникают из-за наличия индуктивности выводов истока. Через вывод стока протекает мощный ток, а также обратный ток включения/выключения от драйвера затвора.

С практической точки зрения невозможно увидеть реальное напряжение на истоке выводного транзистора. Измерив напряжение, мы получим значение лишь на выводе истока, но факти-

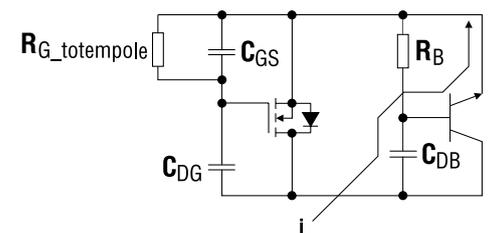


Рис. 5. Тип включения, при котором внутренний транзистор структуры MOSFET оказывает дополнительное влияние

Таблица 1. Параметры новых MOSFET компании International Rectifier

Наименование	V_{DS} , В	$R_{DS(ON)}$ тип. @10 В, мОм	$R_{DS(ON)}$ тип. @4,5 В, мОм	V_{GS} , В	Q_G тип. @ 4,5 В, нКл	Q_G тип. @10 В, нКл
IRF6728M	30	1,8	2,8	± 20	20	8,7
IRF6708S2	30	7,5	12	± 20	6,6	2,2

чески исток транзистора соединяется с источником напряжения через индуктивность вывода. В абсолютном выражении проводник, расположенный над заземленным проводником в свободном пространстве, обладает индуктивностью 0,8 нГн/мм; таким образом, между источником напряжения и истоком транзистора присутствует индуктивность порядка 3...5 нГн. Большие корпуса транзисторов, например, TO220, как правило, имеют большие значения индуктивности истока.

Индуктивность истока обладает свойством оказывать противодействие как при включении транзистора, так и при его выключении. Процессы, возникающие при выключении, гораздо заметнее из-за больших токов, протекающих через устройство, и большей энергии, запасенной в индуктивности истока.

В момент выключения транзистора индуктивность истока пытается сохранить ток в соответствии с выражением $V = -Ldi/dt$. Отсюда следует, что полярность напряжения на индуктивности изменяется мгновенно, как только MOSFET прерывает ток, протекающий через него. До выключения транзистора напряжение на индуктивности истока имело положительный потенциал на кристалле и отрицательный потенциал на выводной рамке транзистора. После выключения, в течение непродолжительного времени, потенциалы на концах индуктивности истока меняются местами. На конце индуктивности, присоединенной к выводной рамке, образуется положительный потенциал. В течение этого периода это напряжение добавляется к напряжению управления затвора.

Несмотря на то, что сигнал управления выключением транзистора выбирает путь наименьшего сопротивления, напряжение от индуктивности истока добавляется к низкому напряжению от драйвера, и тем самым создает паразитный сигнал управления состоянием затвора.

Если это паразитное напряжение достаточно высоко, то оно может включить устройство, противодействуя сигналу драйвера затвора (рис. 7)

Для устранения проблем в высокоскоростных схемах применяются безвыводные корпуса, например, корпус PQFN с технологией медной клипсы от International Rectifier, а также корпус DirectFET. MOSFET в этих корпусах обладают минимальными индуктивно-



Рис. 6. Конструкция большинства выводных MOSFET на примере корпуса D2PAK

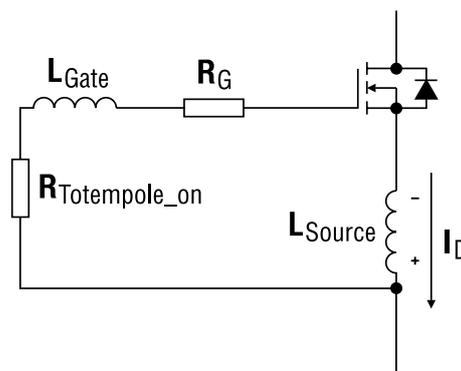


Рис. 7. Включение транзистора паразитным напряжением, действующим против сигнала драйвера затвора

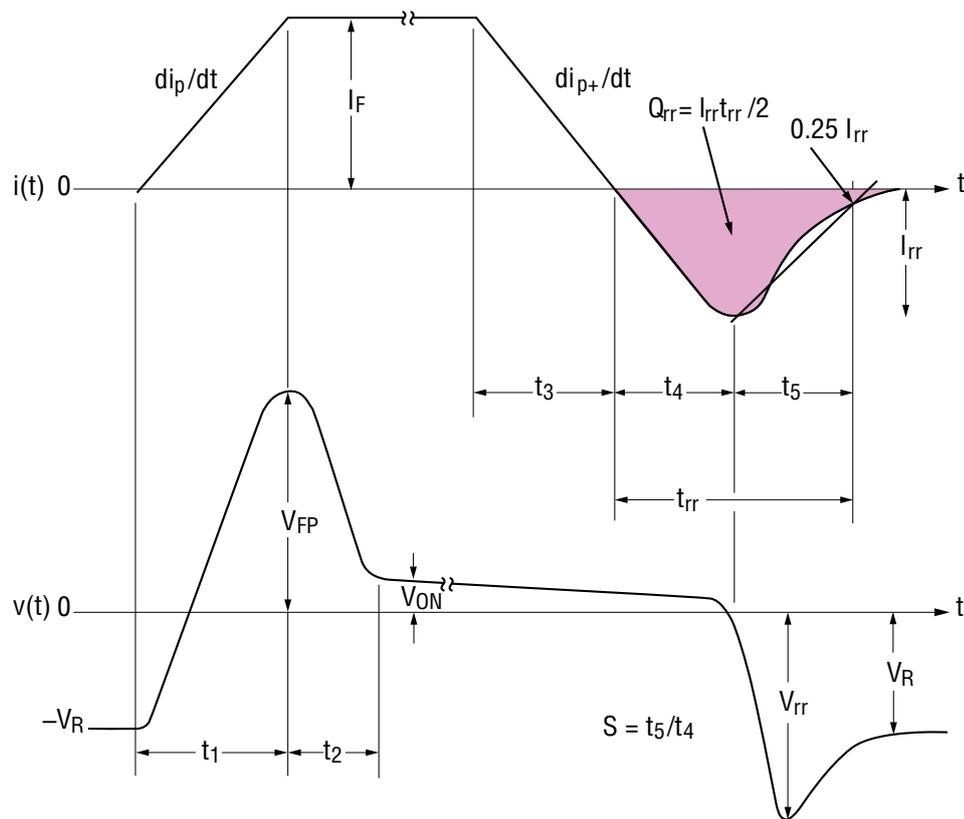


Рис. 8. Типовой график времени обратного восстановления внутреннего диода

стями истока. В устройствах, которые требуют применения выводных компонентов, мы можем подавать на затвор отрицательное напряжение запирающего. При наличии достаточного отрицательного напряжения на затворе паразитный импульс не способен сместить потенциал V_G до порогового значения.

В таблице 1 приведены параметры двух новых MOSFET компании IR –

IRF6708S и IRF6728M, которые требуют применения выводных компонентов, мы можем подавать на затвор отрицательное напряжение запирающего. При наличии достаточного отрицательного напряжения на затворе паразитный импульс не способен сместить потенциал V_G до порогового значения. В таблице 1 приведены параметры двух новых MOSFET компании IR –

дает высокой эффективностью отвода тепла от кристалла за счет двустороннего охлаждения и других конструктивных особенностей.

Ранее мы упоминали диод, который образуется в p-n-переходе MOSFET между n- областью стока и p-каналом истока. Как и любой другой диод, он обладает временем обратного восстановления (рис. 8).

Основными параметрами этого диода являются t_{RR} и Q_{RR} , и условия, при которых они были измерены.

Когда транзистор верхнего плеча в синхронном понижающем преобразователе выключается, индуктивность начинает разряжаться через внутренний диод транзистора нижнего плеча. Это режим потерь, который минимизируют за счет быстрого включения транзистора нижнего плеча. Канал транзистора нижнего плеча открывается и отбирает весь ток на себя, диод закрывается.

Ток обратного восстановления MOSFET течет через канал наряду с током выброса от индуктивности. Суммарный ток может негативно повлиять на область безопасной работы прибора.

Может показаться, что единственным вариантом является выбор MOSFET с наиболее низкими Q_{RR} и/или t_{RR} . Это не так.

Параллельно внутреннему диоду можно подключить внешний диод с более низким напряжением V_F : таким образом, ток потечет в обход внутреннего диода. MOSFET со встроенным диодом Шоттки, называемые FETку, предполагают наличие внутреннего диода Шоттки, включенного параллельно с внутренним диодом, он выполняет ту же самую роль. Прямое напряжение V_F диода Шоттки гораздо меньше, чем у обычного p-n-перехода. Таким образом, Шоттки шунтирует ток выброса. Поэтому быстрый диод Шоттки необходим для уменьшения Q_{RR} . В высоковольтных приложениях, для которых FETkeys не производятся, можно включить внешний диод

Шоттки необходимого или большего напряжения параллельно с внутренним диодом с минимальной индуктивностью.

Лавинный пробой

Самый простой способ объяснить лавинный пробой – использовать flyback-конвертер (рис. 9).

Предположим, что структура цепочки RCD, используемая, чтобы минимизировать выбросы напряжения через переключающийся MOSFET, не является внутрисхемной. Кроме того, узел между стоком MOSFET и индуктивностью первичной обмотки разблокирован.

Когда MOSFET включается, в первичной обмотке начинает нарастать ток в соответствии с выражением $V = -Ldi/dt$. Когда транзистор выключается, полярность напряжения на катушке мгновенно изменяется, добавляясь к напряжению $V+$. Катушка перекачивает напряжение обратно, чтобы поддержать ток и разрядить первичную индуктивность.

С разблокированным стоком напряжение V_{DS} близко или немного выше напряжения $V+$, в этом случае мы наблюдаем лавинный пробой (рис. 10).

Лавинный пробой – когда напряжение на MOSFET повышается быстро и затем отсекается на некотором уровне выше напряжения V_{DS} (обычно 110...115% от V_{DS}). Отсечка происходит, когда напряжение пробоя внутреннего диода MOSFET ограничивает увеличение напряжения. Подтверждением является плоская вершина формы всплеска напряжения.

Лавинный пробой происходит из-за наличия индуктивности. Например, соленоид или двигатель испытывают аналогичный скачок напряжения при открытии ключа с разблокированной нагрузкой.

Существует немало статей на тему лавинного пробоя, в которых подробно описаны методики проектирования и расчета подобных цепей.

Важное отступление по сравнению транзисторов по параметрам лавинного пробоя. Раньше для оценки и тестирования старых транзисторов использовали в качестве нагрузки большие значения индуктивности, для тестирования новых транзисторов используют значительно меньшие величины. Данные различия нужно учитывать, когда производится сравнение транзисторов по параметрам лавинного пробоя, так как новые полевые транзисторы на первый взгляд будут выглядеть значительно хуже по характеристикам, чем более старые.

Линейный режим работы

Рассмотрим работу MOSFET в линейном режиме.

На рис. 11 в логарифмическом масштабе на горизонтальной оси отложены значения напряжения «сток-исток» V_{DS} , на вертикальной оси – значения тока стока I_D . Кривая области безопасной работы описывает прямо-смещенную характеристику MOSFET-транзистора.

Положительный наклон в первой декаде I_D/V_{DS} отражает постоянное сопротивление $R_{DS(ON)}$, отрицательный – постоянную мощность. При низком напряжении MOSFET не может провести номинальный ток из-за сопротивления канала $R_{DS(ON)}$ и низкого значения V_{DS} . Постоянное сопротивление $R_{DS(ON)}$ показано линейно в первой части кривых (линия зеленого цвета) области безопасной работы.

Вторая часть кривой (серая линия) отражает максимальный ток через транзистор. Третья часть (синяя линия) – постоянная мощность MOSFET.

Четвертая часть (линии розового и фиолетового цветов) никогда не описывались, исключение составляют лишь самые новые технические описания у компании IR. Этот сегмент имеет отрицательный наклон свыше постоянной мощности. По сути это выглядит как вторичный пробой в биполярном транзисторе, но это не так. Здесь показана

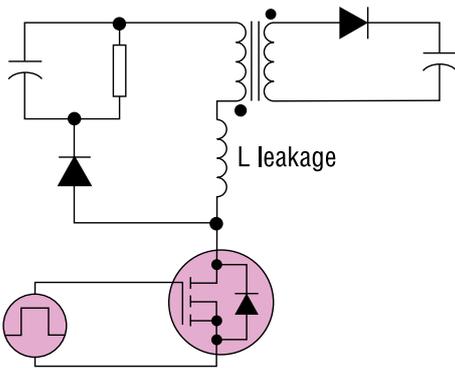


Рис. 9. Схема flyback-преобразователя для демонстрации лавинного процесса

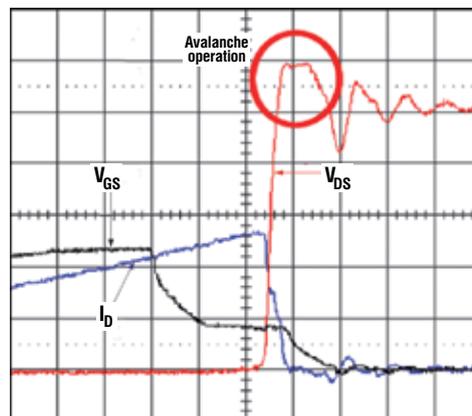


Рис. 10. Ограниченный лавинный процесс во Flyback-преобразователе

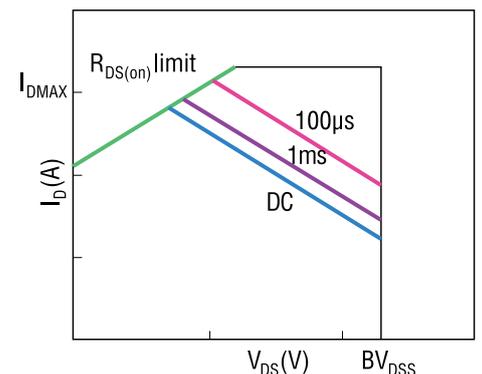


Рис. 11. Область безопасных режимов MOSFET

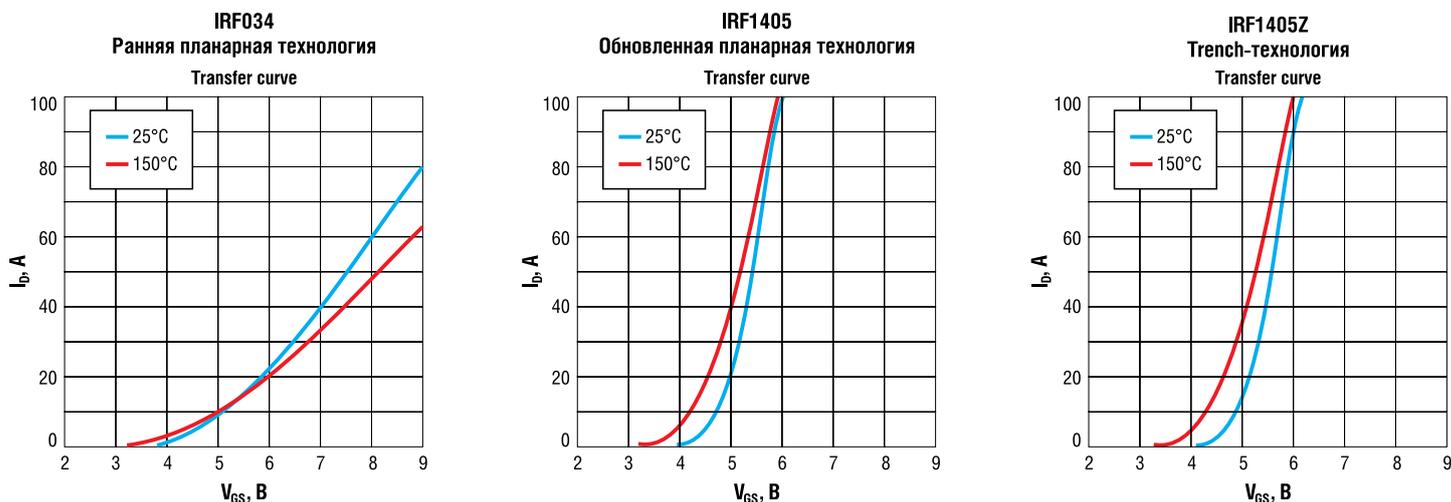


Рис. 12. Сравнение технологий при работе в линейном режиме

область стабильной работы транзистора в стабильном состоянии — напряжение V_{DS} выше, а ток I_D ниже максимально допустимого. Большинство импульсных устройств не работают в этом состоянии. В импульсном источнике питания транзистор находится либо во включенном состоянии, с низким V_{DS} и высоким током (левая верхняя линия области безопасной работы), либо выключен.

Вторая точка перелома на кривой области безопасной работы показывает границу Спирито. Эта точка перегиба возникает из-за микроскопических особенностей транзистора. MOSFET состоит из множества тысяч параллельных ячеек, каждая ячейка обладает примерно одинаковыми значениями V_{DS} и V_{GS} . Единственный параметр, который отличает ячейку от ячейки — усиление. Когда MOSFET находится в режиме насыщения, то разность в усилении не существенна. Но это заметно в линейном режиме. Ячейка с большим усилением пропускает больший ток, что вызывает локальный перегрев. Решением является перевод транзистора в насыщение, тогда ячейки оптимально распределяют ток, не вызывая перегревов. Наиболее оптимально работают в линейном режиме ранние планарные MOSFET. Обладая низкой плотностью ячейки и низким коэффициентом усиления, они лучше распределяют поток тепла на большой площади, что меньше сказывается на параметрах MOSFET в линейном режиме. Ранние планарные транзисторы (рис. 12) лучше подходят для линейных режимов работы, чем Trench-приборы.

Лучше всего это иллюстрируется в сравнении трех различных технологических процессов — ранняя планарная технология, обновленная планарная технология, и Trench-технология.

Для MOSFET, работающих в линейном режиме с постоянным напряжением «затвор-исток» V_{GS} , током стока I_D

и температурой, повышение температуры (с сохранением постоянного значения V_{GS}) и увеличение тока приводит к тепловому уходу и нестабильности. И наоборот, уменьшение тока с ростом температуры приводит к повышению стабильности работы транзисторов в линейном режиме.

На графике ранних планарных MOSFET четко видна точка пересечения, после которой нагрев вызывает тот же или меньший ток для данного значения напряжения V_{GS} . Этого эффекта не наблюдается у MOSFET с обновленной планарной технологией и у Trench.

Обновленные планарные и Trench-MOSFET не подходят для технологий hot-swap и линейного регулирования, так как они тут же выйдут из линейного режима. Эти приложения требуют MOSFET ранней планарной технологии.

Инженеры по применению КОМПЭЛ могут дать вам ответ о технологии производства конкретного MOSFET и о возможности его применения в той или иной схеме.

Данный обзор должен помочь в решении множества проблем при созда-

нии прототипов устройств. И хотя не было затронуто большое количество параметров и основных направлений, была предпринята попытка объяснить основные механизмы, взаимодействия, и возможные пути решения возникающих проблем. Независимо от того проектируется ли DC/DC-преобразователь или схема hot-swap, этот материал будет полезен на всех уровнях, от миниатюрных до многоваттных устройств.

Инженеры компании International Rectifier разработали удобный online-инструмент (он находится на сайте www.irf.com: Design Support → SyncBuck MOSFET Tool) по выбору оптимальной пары MOSFET для понижающих синхронных преобразователей. Введя все необходимые для расчета данные, вы получите список рекомендуемых транзисторов с кратким перечнем их параметров, типа корпуса и ориентировочной стоимостью. ⁵

Получение технической информации,
заказ образцов, поставка —
e-mail: power.vesti@compel.ru

ИДЕАЛЬНЫЕ MOSFET ДЛЯ КОМПАКТНЫХ РЕШЕНИЙ

MOSFET в корпусе SOT-23

- Эталонные характеристики
- Управление затвором 5...12 В

ЛУЧШИЕ размер и цена!

IRLML0030
IRLML2030
IRLML0040
IRLML0060
IRLML2060
IRLML0100