

Учёт динамического поведения моделей полевых транзисторов

Печатается с разрешения *Microwave Journal* (<http://www.microwavejournal.com/>)

Грэм Райли (США)

Для быстрой оценки пригодности и влияния разброса параметров нелинейной модели полевого транзистора можно применять несложные качественные испытания. Такая предварительная оценка позволяет разработчикам избежать дорогостоящих и трудоёмких итераций проектирования.

Современные инженеры сталкиваются с рядом проблем, в том числе, с неадекватными моделями нелинейных устройств, что приводит к неточному моделированию при большом уровне сигнала на высоких частотах. Поэтому, прежде чем передавать проект в производство, разработчик должен знать, подходит ли данная модель для его приложения. К сожалению, трудоёмкость предварительной оценки нелинейной модели часто воспринимается как высокая, поэтому далеко не все инженеры задаются вопросом: «Достаточно ли хороша моя модель?». Неспособность точного учёта динамических аспектов поведения модели устройства может отрицательно сказаться на приложении. Следовательно, построение модели такого поведения важно для точного нелинейного моделирования.

Мощный, основанный на моделировании метод квалификационных испытаний теперь предлагает разработчикам эффективные средства тестирования моделей полевых транзисторов

для нормируемых поведенческих характеристик на высоких частотах при большом сигнале и в рабочей точке, необходимой для приложения. Такой предварительный анализ имеет решающее значение, позволяя разработчикам избежать дорогостоящих и трудоёмких итераций проектирования и их последствий.

ПОНИМАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ

Чтобы лучше понять, почему так важно учитывать динамическое поведение устройства, сначала важно выяснить, что представляет собой это поведение. Динамическое поведение проявляется в том случае, когда результаты измерения параметров объекта зависят от момента начала воздействия (подразумевая память о предыдущем состоянии) и/или от продолжительности рассматриваемого воздействия (постоянные времени процесса/механизма). Такое поведение могут демонстрировать любые полупроводниковые приборы в ответ на

электрическое воздействие, но особенно в присутствии высокочастотных сигналов большого уровня (например, в ВЧ-усилителях, смесителях, генераторах и высокоскоростных цифровых схемах). На динамическое поведение оказывает влияние технология изготовления устройства и его размеры. Но было бы неверно предполагать, что приборы, изготавливаемые по новейшему субмикронному кремниевому процессу, будут реже проявлять динамическое поведение, чем 50-ваттный прибор, выполненный по технологии GaN.

Когда устройство в спокойном (устойчивом) состоянии испытывает воздействие в виде изменения электрических параметров, это изменение не сразу приводит к новому стационарному состоянию. Вместо этого начинают протекать физические процессы с различными постоянными времени. Наблюдаемым результатом является зависящее от времени изменение электрических характеристик, измеряемых на клеммах устройства.

На рисунке 1 изображён отклик тока стока $I_C(t)$ полевого транзистора на скачок приложенного напряжения. После момента $t = 0$ наблюдается быстрая реакция подвижных носителей заряда в канале, и ток $I(t)$ спадает до установившегося значения $I_{\text{быстр}}$. Затем изменение условий оказывает влияние на температуру канала и для некоторых технологий на зарядовое состояние ловушек (дефекты/неоднородности в кристаллической решётке устройства, которые проявляются в виде дискретных энергетических уровней запрещённой зоны материала). В свою очередь, изменение температуры канала и состояния ловушек влияет на видимую подвижность носителей в канале и вызывает изменение тока, пока он не достигнет равновесного состояния ($I_{\text{медл}}$). Это изменение состояния с течением времени также можно рассматривать как реакцию прибора (только другим способом)

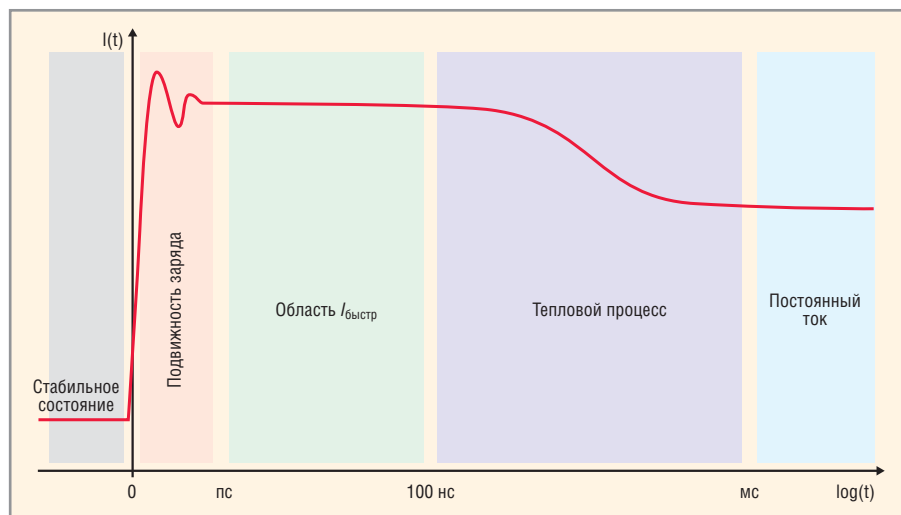


Рис. 1. Реакция $I(t)$ на скачок напряжения в момент времени $t = 0$

на различные приложенные частоты или полосу качания.

Зависимость тока от напряжения $I(V)$, полученная при разной эффективной длительности импульсов, и реакция на скачок напряжения, который мы видим на рисунке 1, показаны на рисунке 2. Обратите внимание, что характеристика $I(V)$, измеренная на постоянном токе, не совпадает с той же характеристикой, наблюдаемой на высокочастотном сигнале.

Из кривых $I(V)$ на рисунке 2 можно сделать вывод, что производные тока I по напряжению V зависят от времени. Взгляните на частные производные di_c/dv_z или g_m . Очевидно, что усиление будет отличаться для высокочастотного сигнала по сравнению с медленно изменяющимся сигналом. Аналогичным образом генерация гармоник и продуктов интермодуляции зависит от производных $I-V$ и для других ключевых величин, таких как коэффициент мощности соседнего канала (ACPR), АМ-ФМ, амплитуда вектора ошибки (EVM) и эффективность питания (PAE). Неточное описание ВАХ в модели прибора даст неправильные реакции для этих важных показателей.

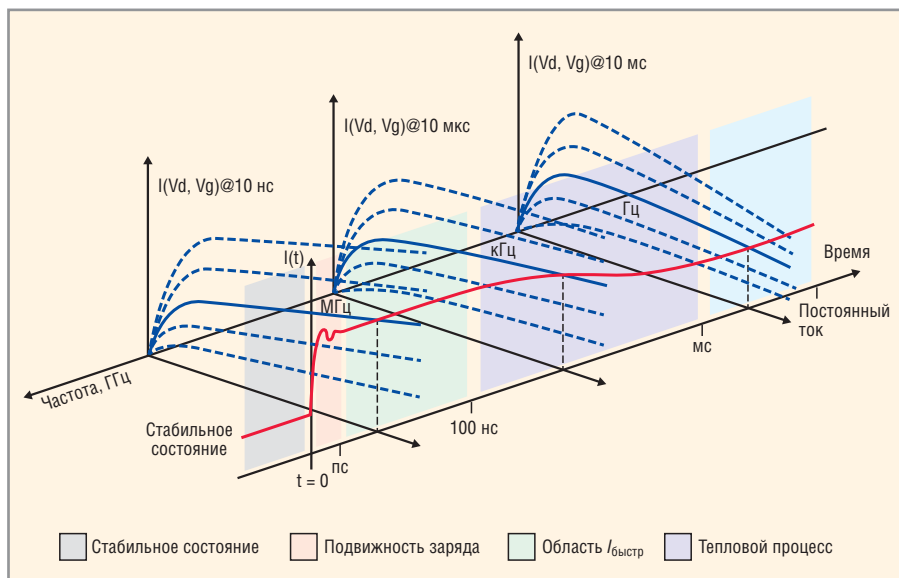


Рис. 2. Взаимозависимость графиков $I(V)$ и $I(t)$ в результате реакции на скачок

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ

В то время как для учёта динамического поведения моделей полупроводниковых приборов разработано несколько подходов, остаётся сложным определение, хорошо ли подходит модель к соответствующим измеренным данным. Модель, учитывающая только ВАХ постоянного тока и

квазистатические S-параметры, вряд ли даст точные результаты для высокочастотного сигнала большого уровня. Данные о поведении на высокой частоте при большом уровне сигнала должны быть использованы в качестве одного из критериев подстройки модели. Кроме того, для оценки точности модели необходимо смоделировать ряд тестов на вы-

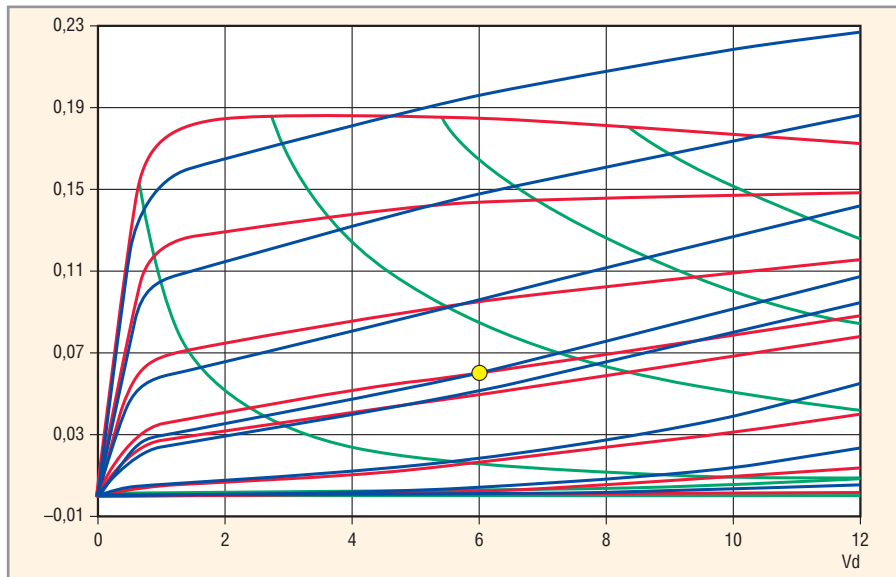


Рис. 3. Семейство ВАХ, демонстрирующее зависимость $I(V)$ на постоянном токе, зависимость $i(v)$ для импульсов и зависимость мощности на постоянном токе

сокой частоте при большом уровне сигнала.

Тестовое моделирование полевого транзистора на высокой частоте при большом уровне сигнала можно выполнить различными способами. Самый простой, быстрый и информативный метод заключается в проверке динамических характеристик и точности модели путём сравнения ВАХ постоянного тока ($I(V)$) с импульсной ВАХ ($i(v)$). Исследование характерных областей импульсной ВАХ $i(v)$ может предоставить важную информацию об общей пригодности модели для данной задачи. Например, оно позволит определить, моделируется ли соответствующее динамическое поведение, хорошо ли модель подходит для применения на высокой частоте при большом уровне сигнала в конкретном приложении, и изучить допустимый диапазон использования модели.

Кроме того, было бы полезным рассмотреть реакцию устройства на скачок $i(t)$ и посмотреть, рационально ли его поведение. Заранее сконфигурированные процедуры тестового моделирования и измерения, подобные тем, что входят в состав САПР Agilent ADS, позволяют быстро и всесторонне оценить зависящее от времени поведение прибора. В трёх таких испытаниях используется одиночный импульс $i(v)$, непрерывная последовательность импульсов $i(v)$ и скачок $i(t)$. Для испытаний одиночным импульсом $i(v)$, начиная с рабочей точки Q статического режима, на затвор и сток транзистора одновременно подаются импульсы равной длительности. Затем

измеряется ток через эти выводы в определённой пользователем точке импульса, и получаются значения для построения импульсной ВАХ $i(v)$. В испытаниях на непрерывную последовательность импульсов $i(v)$ используется та же базовая методика, за исключением того, что каждый импульс подаётся в рамках одной развёртки по времени, а не отдельных развёрток для каждого импульса. В испытании на скачок $i(t)$, напряжения на выводах прибора одновременно изменяются от точки Q до требуемой конечной точки и удерживаются в таком состоянии в течение всего испытания, при этом регистрируются изменения тока через вывод.

ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ С ПОМОЩЬЮ ИМПУЛЬСНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для проверки первичных характеристик модели, относящихся к динамическому поведению, можно использовать ряд качественных тестов. И хотя эти тесты не гарантируют точных результатов моделирования схемы, они позволяют быстро выявить сомнительное поведение модели, требующее дальнейшего исследования.

ТЕСТ ВЫХОДНОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Семейство ВАХ на рисунке 3 показывает разницу между зависимостью $I(V)$ на постоянном токе (красная), зависимостью $i(v)$ для импульса (синяя) и зависимостью мощности на постоянном токе (зелёная). Исследование набора импульсных характеристик $i(v)$ выше

перегиба демонстрирует относительно постоянное положительное значение выходной проводимости для всех кривых с постоянным напряжением на затворе V_3 . Набор кривых $I(V)$ для постоянного тока демонстрирует разные значения выходной проводимости в пределах графика, причём для больших рассеиваемых мощностей наблюдаются отрицательные значения. Эта разница связана с тем, что кривые $I(V)$ для постоянного тока содержат «скрытую» зависимость от температуры канала и состояния ловушек.

ОБЩАЯ ФОРМА КРИВЫХ $i(v)$ (В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТОЧКИ Q)

Каждая заданная точка смещения Q характеризуется уникальным сочетанием рассеиваемой мощности и состояния ловушек. Форма импульсных кривых $i(v)$ меняется в зависимости от параметров этой точки Q. Способность отслеживать это важное поведение является основной задачей модели прибора. Некоторые модели оптимизированы для конкретной точки Q и точно предсказывают поведение прибора только относительно этой точки. Применение такой модели с другой точкой Q, имеющей значительно отличающиеся параметры, обычно приводит к ухудшению характеристик. Насколько важным является это ухудшение для общей точности, зависит от конкретного приложения. Лишь некоторые эмпирические модели могут точно описать общий случай, и если не подстроить их с помощью данных, полученных в нескольких точках Q, модели будут неточными.

ОТСЕЧКА

Как и в случае характеристик $I(V)$ на постоянном токе, импульсные кривые $i(v)$ должны демонстрировать отсечку как функцию напряжения на затворе. Вообще говоря, хотя значения напряжения на затворе V_3 при отсечке могут отличаться и формы кривых тоже могут отличаться вблизи этой области, модель устройства должна по-прежнему демонстрировать отсечку до $I_c = 0$ и для постоянного тока, и для импульсных сигналов.

СМЕЩЕНИЕ ТОКА СТОКА В НАЧАЛЬНОЙ ТОЧКЕ

Некоторые модели не могут точно предсказать поведение прибора вдали от смещения их импульсной характеристики $i(v)$. Это проявляется в виде

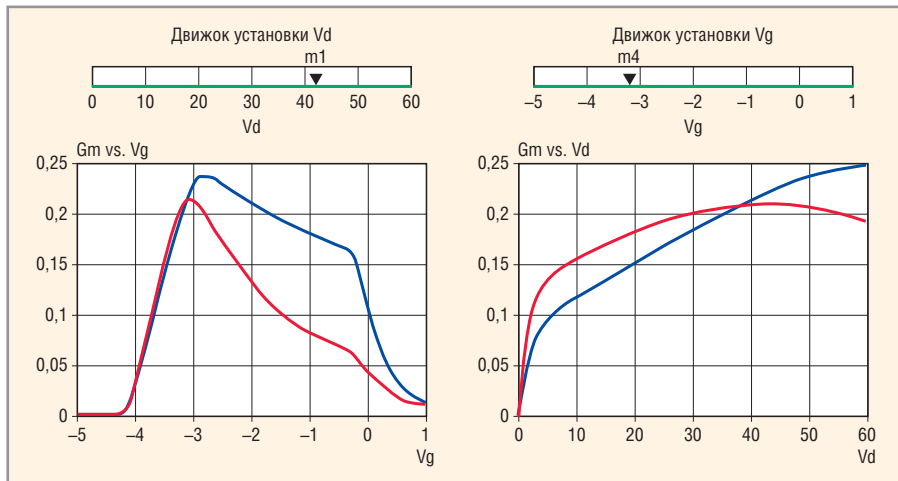


Рис. 4. Графики изменения крутизны G_m , построенные в результате моделирования на постоянном и импульсном токе

смещения импульсных кривых $i(v)$ в начальной точке. В тех случаях, когда смещение очевидно, разработчик должен исследовать влияние этого искажения на целевое приложение.

Точка смещения

Совпадающий характер точки смещения и на постоянном токе $I(V)$, и на импульсной $i(v)$ характеристике является фактом. Это состояние является и логичным, и необходимым, поскольку характеристика $I(V)$ на постоянном токе является, в сущности, набором смещённых точек покоя, из которых можно выполнять любые импульсные измерения.

Крутизна характеристики – G_m

На рисунке 4 хорошо заметна разность между значениями G_m , полученными на постоянном и импульсном токе. Эта разность подчёркивает важность точного моделирования разброса характеристик устройства. Производные высшего порядка, которые описывают продукты интермодуляции и гармонические составляющие, ведут себя аналогичным образом.

Эффекты памяти

Если реакция прибора на воздействие зависит от истории его работы, то говорят, что он «помнит» прошлое и, следовательно, обладает эффектом памяти. Для модели прибора без эффекта памяти результаты моделирования будут одинаковыми для данной точки импульсной кривой $i(v)$, независимо от числа импульсов, порядка их следования или покрытия плоскости $I-V$. Для приборов, обладающих эффектом памяти, это не так, и условия одинаково-

вого импульсного возбуждения могут приводить к различным характеристикам.

Реакция на скачок

Этот тест выявляет поведение, показанное на рисунке 1. Кроме того, он проверяет постоянные времена, связанные с конкретным прибором или его моделью. Этот тест часто выполняют, чтобы убедиться в том, что имитируемые импульсные измерения $i(v)$ используют достаточно быстрые импульсы для точного описания плоского высокочастотного участка, показанного на рисунке 1.

Заключение

Учёт динамических характеристик и поведения полевых транзисторов во всех электрических моделях является важным для точного нелинейного моделирования. К счастью, теперь разработчики могут использовать мощный, основанный на моделировании метод определения пригодности моделей полевых транзисторов, чтобы выявить ключевые особенности поведения на высоких частотах в присутствии больших сигналов и в рабочей точке, необходимой для данного приложения. Кроме того, для быстрой оценки пригодности и влияния разброса параметров данной модели полевого транзистора можно применять несложные качественные испытания. Такая предварительная оценка имеет решающее значение для исключения дорогостоящих и трудоёмких задач на поздних этапах проектирования.

Приведённые в настоящем документе характеристики и описания продуктов могут изменяться без предварительного уведомления.

