

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ВЫСОКОЙ ЕМКОСТИ СОЕДИНЕНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СХЕМЫ ПРИ ТЕСТИРОВАНИИ МАЛОМОЩНЫХ МОП-ТРАНЗИСТРОВ

MOSFETS CHARACTERIZATION IN THE LOW POWER RANGE: OVERCOMING TEST CONNECTION CHALLENGES DUE TO HIGH CAPACITANCES

Андреа Винчи (Andrea Vinci), менеджер отдела маркетинга, Tektronix/Keithley

ВВЕДЕНИЕ

В полупроводниковой промышленности постоянно ведутся исследования по поиску специальных материалов, диэлектриков и новых геометрических форм с целью дальнейшего уменьшения размеров полупроводниковых приборов. Горизонтальные и вертикальные гетероструктуры из двухмерных решений, например, способствовали появлению революционно новой миниатюрной маломощной электроники.

Исследователи, ученые и инженеры отрасли сталкиваются с общими сложностями при внесении в отчеты точных электрических параметров таких полупроводниковых приборов, как специальные полевые нанотранзисторы. Более того, иногда им приходится доказывать, что они действительно способны контролировать эти параметры простым и воспроизводимым способом.

Типичная проблема измерения электрических характеристик в диапазоне малых токов — это необходимость определить при различных условиях достижимые показатели МОП-транзисторов малой мощности с малым током утечки.

Tektronix

Эти измерения очень важны, поскольку они определяют конкретные показатели качества (FoM), которые подтверждают или не подтверждают эффективность изделий в рамках конкретных применений.

Например, для МОП-транзистора n-типа требуется определить токи стока в открытом и закрытом состоянии при различных значениях напряжения источника стока и затвора. Показатели качества могут отличаться в зависимости от применения, но принцип их получения является общим: имеются прецизионные источники напряжения и тока, выходные сигналы которых подаются на исследуемое устройство и изменяются определенным образом, а измеряемые величины соотносятся с каждым изменением подаваемых сигналов.

На практике проблема решается с помощью определенного количества источников-измерителей (SMU) — специальных приборов, способных подавать нужный ток или напряжение для измерения как тока, так и напряжения исследуемого устройства.

Но там, где практическое решение кажется простым и очевидным, множество «подводных камней» может привести к неудачам и вводящим в заблуждение результатам. Давайте их рассмотрим.

Но там, где практическое решение кажется простым и очевидным, множество «подводных камней» может привести к неудачам и вводящим в заблуждение результатам. Давайте их рассмотрим.

ВАЖНЫЙ ВОПРОС, КОТОРЫЙ ВЫ ДОЛЖНЫ СЕБЕ ЗАДАТЬ

Все чаще и чаще инженеры попадают в ловушку, забывая проанализировать измерительную систему как единое целое. Или, проще говоря, они явно видят исследуемое устройство и свои прибо-

ры, но не учитывают того, что находится между ними.

Например, я неоднократно видел, как пользователи осциллографов забывали о том, что при подключении к определенной контрольной точке на печатной плате они использовали пробники, влияющие на результат измерения.

Те, кто вспоминали о влиянии пробника на сигналы, как правило, забывали о влиянии измерительного кабеля и о проблемах, связанных с взаимным влиянием сигналов.

«Да ладно, это тоже имеет значение?» — спрашивали они. Всё имеет значение. К сожалению. И мы должны это учитывать.

При измерении характеристик по постоянному току ситуация та же. Даже если физическое зондирование на тестируемом приборе оставить сложным и дорогим зондовым станциям, то SMU, подающие напряжение и измеряющие ток, соединяются с проб-картой с помощью кабелей.

Должны ли мы рассматривать кабели как то, что потенциально влияет на результаты измерений?

Независимо от ответа, важно, чтобы вы всегда задавали себе этот вопрос перед тем, как продолжить работу, и главное, чтобы вы были убеждены в правильности ответа.

Типичным примером важности учета влияния соединений являются точные измерения в процессе производства КМОП-приборов. Фактически это означает, что в схему измерений добавляются емкости соединений. А поскольку измерения современных МОП-транзисторов проводят в более широком диапазоне частот, любой эффект от добавления емкостей должен быть тщательно учтен.

В первую очередь рассмотрим, как соединение влияет на емкость. Автоматизированное оборудование для параметрического тестирования обычно подключается триаксиальными кабелями, обеспечивающими ма-



лошумящее соединение между источником-измерителем и исследуемым устройством (ИУ).

Триаксиальные кабели похожи на коаксиальные, но в них часть введенных помех экранируется дополнительной внешней медной оплёткой. Хотя экранирующая оплётка уменьшает распределенную емкость кабеля, но когда общая длина кабеля становится значительной, добавленная емкость кабеля может повлиять на ваши измерения.

Давайте рассмотрим практический пример использования системы для измерений параметров n-MOP транзисторов. Здесь измерительная система на основе SMU используется для построения вольт-амперных характеристик, которые также называют выходными или передаточными характеристиками.

Напряжение затвора запрограммировано на свипирование вверх и вниз (как было сказано выше, на SMU). При этом измеряется ток стока (также с помощью SMU).

Эти характеристики позволяют собрать полезные данные для точного моделирования параметров открытия и закрытия канала транзистора, определить линейный участок характеристики, найти точку перехода в режим насыщения, а также узнать, насколько эффект самонагрева потенциально способен изменить значения этих параметров и сдвинуть кривые.

Когда измерения характеристик касаются моделирования поведения носителей заряда — электронов и дырок, — которые перепрыгивают между состояниями и изменяют свою подвижность в зависимости от различных условий, измерительная система подключается к ИУ по четырехпроводной схеме с использованием траксиальных кабелей.

В ней общая длина кабелей равна сумме длин кабелей «высокий уровень, источник» и «высокий уровень, измеритель».

Исходя из удельной емкости триаксиального кабеля (пФ/м), расчетная емкость двух триаксиальных кабелей длиной 20 м (10 м + 10 м), соединяющих SMU с выводами ИУ, находится в диапазоне от 2 нФ для ёмкости guard-экрана до более 6 нФ для ёмкости shield-экрана.

При измерении передаточной характеристики на малых токах (порядка наноампер) не удастся воспользоваться высокой чувствительностью SMU, поскольку емкостная нагрузка кабеля вызывает возбуждение.

Чувствительность SMU должна сочетаться со способностью выдерживать также значительные емкостные нагрузки, создаваемые кабелями или любыми проводниками, соединяющими SMU с ИУ.

Если это не так, то чувствитель-



ность будет бесполезной, и прибор зарегистрирует только паразитные колебания.

Возможность определить условия, при которых емкость измерительных кабелей влияет на измерения, становится все более и более критичной. Разумеется, в таких ситуациях специалисты Keithley предоставляют исчерпывающие консультации, позволяющие клиентам избежать этих подводных камней.

Если в схеме имеются длинные соединительные кабели или между измерительной системой и ИУ включен матричный коммутатор, или во всех случаях, когда измерение ИУ на пластине выполняется в наноамперном диапазоне, очень важно еще раз проанализировать измерительную схему и обратиться за той или иной консультацией.

НОВЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ДИАПАЗОНОВ МАЛЫХ ТОКОВ

В этих особо сложных условиях для измерений могут потребоваться специальные модули SMU.

Компания Keithley выпустила специальную версию SMU для работы с системами параметрического анализа, такими как параметрический анализатор 4200A-SCS.

SMU средней мощности 4201-SMU и SMU высокой мощности 4211-SMU (с опциональным предусилителем 4200-PA) гарантируют выполнение измерений малых токов даже в схемах с большой емкостью длинных кабелей. Фактически эти модули могут быть источниками и измерителями в измерительных схемах, емкость соединений которых в 1000 раз выше, чем возможно сегодня. Например, если уровень тока составляет от 1 до 100 пА, то новые модули Keithley остаются стабильными при емкости нагрузки до 1 мкФ. Для сравнения, максимальная емкостная

нагрузка SMU других производителей, при которой они сохраняют стабильность, составляет всего 1000 пФ, что в 1000 раз хуже.

ВЫВОДЫ

Путь к оптимизации полупроводниковых материалов для интегральных транзисторов с низким сопротивлением открытого канала, особой геометрией и структурой также требует постоянного совершенствования измерительных технологий. Успех транзисторов на основе нитрида галлия для перспективной силовой электроники тесно связан с наноструктурами, используемыми в процессе их производства. Более низкие емкости затвора заставляют рассматривать все другие значительные емкости, такие как емкости кабелей и разъемов, и преодолевать проблемы, повышая способность SMU выдерживать эти емкости для обеспечения стабильности измерений. ☑

The Semiconductor Industry is always searching for new special materials, dielectric solutions and new device geometries for scaling down the device size further and further. Lateral and vertical heterostructures of 2D materials for instance have led to new revolutionary tiny and low power electronics. It's the typical problem of electrical characterization in the low current range: the need to identify the attainable device performance under different conditions for low power / low leakage currents MOSFETs. The problem is practically solved by using a certain number of source measure units (SMUs), special instruments capable of sourcing current or voltage while measuring both current and voltage.