

ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ — ОТ ЛАБОРАТОРИИ ДО ПРОИЗВОДСТВА

THE CHALLENGES OF CHARACTERIZING — POWER DEVICES FROM LAB TO FAB

Ли Стауффер (Lee Stauffer)

С недавних пор повсеместное стремление к повышению энергоэффективности заставляет производителей повышать качество силовых полупроводниковых приборов, таких как диоды, полевые транзисторы (ПТ), биполярные транзисторы с изолированным затвором (БИЗ) и т. д. Новые технологии обещают улучшение характеристик — уменьшение потерь в открытом состоянии и меньшую утечку в закрытом состоянии, повышение скорости переключения и уменьшение коммутационных потерь. Однако чем лучше становятся характеристики этих п/п приборов, тем сложнее их измерять. В этой статье я сначала опишу типичный процесс разработки силовых п/п приборов (рис. 1), а затем мы обсудим некоторые проблемы, связанные с измерением их характеристик и необходимым для этого оборудованием.

KEITHLEY

на данном этапе обычно включает снятие вольт-амперных характеристик (ВАХ) с помощью простого характеристикографа. Разработчику нужна измерительная аппаратура, которая быстро и просто настраивается, обладает интерактивными органами управления для установки уровней тока и напряжения, быстро отображает результаты измерений, позволяя с большой скоростью определять соответствующие предельные напряжения. Поскольку выполнение подобной задачи обычно не требует высокой точности и чувствительности, то здесь вполне можно воспользоваться характеристикографом.

напряжение, считывать значение тока, определять, действительно ли существуют спроектированные соединения и р-п переходы, измерять типовое напряжение пробоя или ток в открытом состоянии, которые способны выдержать устройство.

Самой распространенной проблемой в этой ситуации является безопасное подключение характеристикографа к зондовой станции. Обычно характеристикографы используются для тестирования корпусированных приборов, но ведь гораздо эффективнее тестировать приборы прямо на полупроводниковой пластине, что исключает затраты и время на установку в корпуса бракованных кристаллов. Новейшие источники-измерители (SMU) повышенной мощности, такие как Keithley SourceMeter® 2651A и 2657A, обеспечивают более безопасное и точное подключение при лучшем контроле тока и напряжения. Разработчик может управлять прибором с передней панели или через встроенный web-интерфейс, совместимый с LXI. Прибор также можно подключить к внешнему контроллеру, на котором запущено приложение по тестированию, созданное с помощью разработанного Keithley ПО ACS Basic Edition для п/п приборов и дискретных компонентов. Это ПО предлагает простой режим характеристикографа, позволяющий точно подавать напряжение и считывать значения тока.

Чаще всего при тестировании опытных образцов проверяется напряжение пробоя сток-исток (V_{DSS}). При ручном измерении V_{DSS} напряжение медленно увеличивается до достижения заданного тока. Более быстрый и эффективный способ заключается в подаче заданного тока и измерении установившегося напряжения. Для этого нужен прибор, оборудованный точным и быстрым вольтметром с функцией удержания стабильного показания. Поскольку для этого теста удобно использовать импульсные сигналы, то перед снятием показаний пользователь должен убедиться, что напряжение достигло конечного значения и установилось. Новейшие SMU сочетают быстроту установки напряжения со скоростью и точностью аналого-цифрового преобразования, благодаря чему получают до-

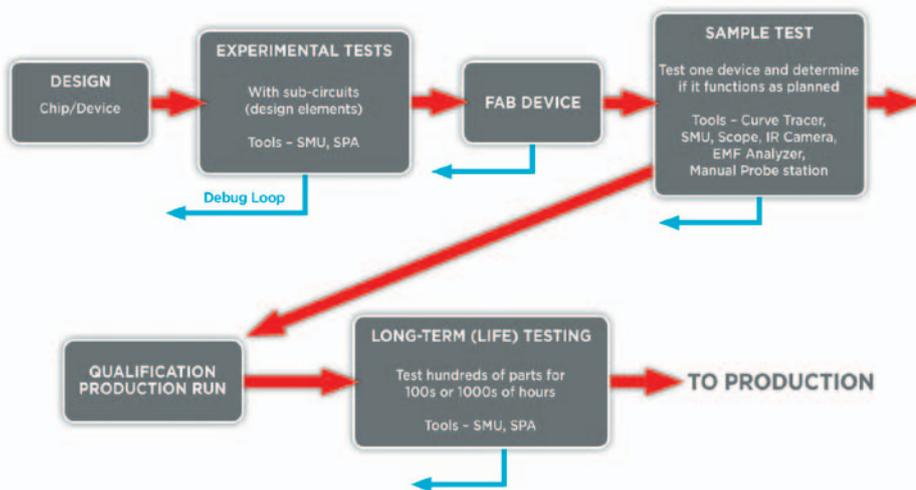


Рис. 1. Типичный процесс разработки силового полупроводникового прибора — от лаборатории до производства

С появлением новых технологий процесс изготовления нередко разрабатывается одновременно с разработкой планируемых к производству п/п приборов. В ряде случаев для тестирования некоторых этапов этого процесса разработчик устройства может использовать простые тестовые схемы, изготавливаемые в одном технологическом цикле с целевым п/п прибором. Эти схемы могут включать диоды Шоттки и биполярные диоды, резисторы и конденсаторы. Тестирование

Следующим (а во многих случаях — первым) шагом является изготовление опытного образца. Измерение его характеристик начинается с простого снятия ВАХ для определения базовых параметров. Обычно разработчик знает ожидаемые характеристики п/п прибора, но не знает, как на самом деле поведет себя прибор. И снова для эффективного и простого выполнения данной задачи хорошо подойдет характеристикограф. Он позволяет разработчику подавать на образец строго контролируемое

стоверные результаты измерения напряжения пробоя.

Другим важным параметром являются токи утечки стока и затвора. В старых кремниевых полупроводниковых приборах они составляли несколько микроампер, но применение новых материалов на основе карбида кремния и нитрида галлия позволило значительно уменьшить эти токи. Для точного измерения в нано- и даже пикоамперном диапазоне необходим прибор с достаточной чувствительностью, а также соответствующие кабели и разъемы. В данном контексте под «соответствующими» понимаются триаксиальные кабели и активные экраны, которые раньше никогда не использовались в оборудовании для тестирования высоким напряжением. Триаксиальные кабели не только минимизируют паразитные токи утечки, но и защищают полезный сигнал от шумов, позволяя устройству быстрее переходить в установившийся режим.

Измерение сопротивления стока-исток в открытом состоянии имеет очень важное значение, но присущая ему сложность зачастую не позволяет выполнить его точно. К типичным источникам ошибок этого измерения относятся недостаточная чувствительность вольтметра, уровень шума и сложность компенсации падения напряжения на измерительных проводах. Поскольку значение этого сопротивления может составлять несколько миллиом, то регистрируемое падение напряжения будет очень мало даже при токах 50 А и более. В такой ситуации характернографы просто не смогут обеспечить достаточной чувствительности по напряжению. В некоторых случаях пользователи пытаются создавать измерительные схемы, объединяя источники питания с высокочувствительными вольтметрами, но применению таких решений обычно мешают проблемы с синхронизацией и временем установления. Большинство п/п приборов способно выдерживать большие токи лишь в течение очень малого времени, зачастую порядка нескольких миллисекунд. При этом небольшой паразитной индуктивности измерительных проводов достаточно, чтобы увеличить время установления и, соответственно, погрешность результата измерения.

Измерение порогового напряжения МОП транзистора тоже связано с некоторыми интересными проблемами. Например, один из способов измерения порогового напряжения заключается в поддержании на стоке фиксированного напряжения при одновременном свипировании напряжения на затворе и измерении тока стока. Однако во избежание перегрева, который может изменить характеристики транзистора, на затвор нужно подавать импульсное напряжение. Для достижения необходи-

мой точности и воспроизводимости импульсных измерений очень важно, чтобы вся измерительная схема гарантированно достигла устойчивого состояния. Не так давно мы столкнулись с одной интересной проблемой, связанной с неопределенностью измерения напряжения на затворе, которая была вызвана остаточным сопротивлением соединительных проводов, подключенных к истоку транзистора. Сильный импульс тока, протекающего от стока к истоку, вызывал повышение напряжения истока по отношению к затвору, снижая тем самым напряжение на затворе и вызывая ошибку. Подключив измерительные провода непосредственно к истоку, мы смогли исключить эту погрешность.

В ряде случаев разработчики делятся полученными ими начальными данными с технологами, которым нужно настроить некоторые параметры технологического процесса, чтобы точнее обеспечить заданные характеристики изготавливаемого п/п прибора. Когда разработчик решит, что прибор в целом готов, то он может перейти к более детальному тестированию образца. Кроме статических измерений ВАХ на постоянном токе, этот этап включает измерение параметров импеданса на переменном токе, таких как входная, выходная и проходная емкость (C_{ISS} , C_{OSS} , C_{RSS}). Измерение емкости может оказаться весьма непростой задачей, поскольку требует соответствующей компенсации паразитных импедансов кабелей и тестовой оснастки. Обычно коррекция осуществляется путем калибровки с использованием калибровочных мер ХХ и КЗ, но их подключение к тестовой оснастке или зондовой станции может оказаться весьма сложным делом. Следует использовать коаксиальные кабели и тщательно следить за тем, чтобы их экраны соединялись между собой как можно ближе к измеряемому п/п прибору.

Кроме того, разработчики обычно измеряют ряд других динамических характеристик, включая время нарастания и спада (t_r , t_f), задержку переключения (t_{don} , t_{doff}) и время обратного восстановления (t_{rr}). Для мощных ПТ и БТИЗ выполняются многочисленные измерения заряда, включая полный заряд затвора (Q_G), заряд затвора до и после порога отпирания (Q_{GS1} , Q_{GS2}), заряд стока (Q_{GD}) и заряд выхода (Q_{OSS}). Ограниченная применимость для этих измерений характернографов становится совершенно очевидной, и они все чаще заменяются современными цифровыми анализаторами параметров полупроводниковых приборов (SPA). Но до недавнего времени даже SPA не обладали достаточной мощностью и функциональностью для выполнения измерений многих характеристик заряда. Одним из примеров является сложное измере-

ние динамического сопротивления в открытом состоянии (которое в НЕМТ-транзисторах на основе нитрида галлия иногда называют «коллапсом тока»). В ходе этого теста на транзистор подается полное напряжение пробоя (обычно 600 В), а затем через него пропускается полный ток открытого состояния (зачастую до 50 А); при этом контролируется быстрое изменение сопротивления в открытом состоянии $R_{DS(ON)}$. Это изменение может начаться через несколько микросекунд и продолжаться до нескольких миллисекунд. Новейшие мощные SMU компании Keithley оборудованы многочисленными цифровыми функциями, такими как быстроедействие дигитайзеры, предназначенные для упрощения регистрации важных данных (см. рис. 2). Кроме того, на этапе тестирования образцов используются генераторы импульсов и осциллографы, ИК-камеры, измерители ЭДС и зондовые станции. В некоторых случаях п/п приборы могут устанавливаться в корпуса для облегчения тестирования в специально разработанной тестовой оснастке, а не на п/п пластине.

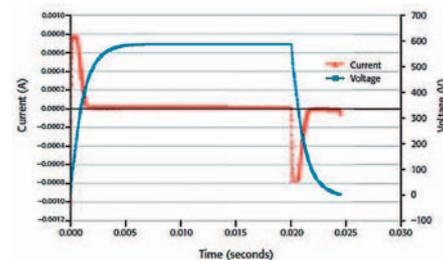


Рис. 2. Высоковольтный импульс, демонстрирующий неустановившийся ток переходного процесса

По завершении испытаний образца разработчик переходит к испытаниям опытной партии. Значительное число тестируемых приборов и большой объем результирующих данных обычно требуют более масштабной автоматизации процесса. И хотя многие производители контрольно-измерительного оборудования предлагают автоматизированные системы тестирования силовых п/п приборов, такие системы стоят дорого, а диапазон выполняемых ими тестов зачастую ограничен. Например, типичный ток утечки мощного ПТ на основе карбида кремния может быть меньше одного наноампера, а чувствительность автоматического измерителя часто ограничена сотнями наноампер или даже микроамперами. Одно из решений заключается в том, что производитель силовых п/п приборов создает собственное решение по автоматизированному тестированию на основе высокопроизводительного измерительного оборудования. К таким измерительным приборам относятся новейшие мощные SMU, которые предлага-

ют многочисленные функции, упрощающие создание автоматизированных систем, например, встроенная функция исполнения сценариев и виртуальная соединительная панель для синхронизации нескольких измерительных приборов в более сложных решениях. Компания Keithley предлагает даже специализированное программное обеспечение для управления автоматическими тестерами. ПО Automated Characterization Suite (ACS) специально предназначено для управления регистрацией данных, поступающих от нескольких тестируемых устройств, на которых выполняется по несколько измерений.

Когда разработчик решит, что испытание опытной партии успешно завершено, он переходит к этапу производственных квалификационных испытаний. Для полупроводниковых пластин может проводиться долговременное ресурсное испытание с целью проверки надежности в разных условиях работы, близких к реальным. Обычно такой тест выполняется параллельно на крупных партиях п/п приборов, установленных в камеру для климатических испытаний. Многие сотни приборов тестируются в течение сотен и тысяч часов при различных электрических и климатических воздействиях. В большинстве случаев разработчик сам задает условия, которые он хочет проверить, что требует от

испытательного оборудования достаточной гибкости и простоты настройки. Создание и поддержание параллельно работающих контрольно-измерительных ресурсов, мониторинг и управление большими объемами данных, полученными на этом этапе, может стать непосильной задачей. К типичным тестируемым параметрам на этом этапе относятся ток утечки (I_{DSS} и I_{GSS}), сопротивление в открытом состоянии ($R_{DS(ON)}$) и дрейф порогового напряжения (ΔV_{TH}).

Сопоставление результатов, полученных в разных условиях, всегда затруднено, и немаловажную роль здесь играет тот факт, что для измерения могут использоваться различные измерительные системы (каждая из которых обладает собственными уникальными возможностями и источниками погрешностей). Сегодня все большее число изготовителей п/п приборов стремится к применению единого набора измерительного оборудования. Таким образом, например, ток утечки опытного образца, измеренный на ранних этапах проектирования, можно сопоставить с током утечки серийных п/п приборов.

Измерять параметры силовых п/п приборов всегда было сложной задачей. Использование традиционного контрольно-измерительного оборудования для измерения характеристик

новых силовых п/п приборов зачастую не дает удовлетворительных результатов, что создает проблемы для разработчиков. К счастью, компании, производящие это оборудование, избрали правильный путь и начали предлагать новые решения, оптимизированные для измерения характеристик и тестирования силовой электроники. 

The recent drive toward greater energy efficiency has created an increasing demand for better high power semiconductor devices such as diodes, FETs, IGBTs and others. New technologies hold the promise of higher performance, including lower ON-state losses, lower OFF-state leakage, faster switching, and reduced loss while switching. However, along with the improved performance of these devices, characterization and measurements are becoming more complex and difficult. This article addresses a typical workflow in the design and development of a power semiconductor device, and discusses some of the equipment and measurement challenges associated with them.



АКТАКОМ - ТЕПЕРЬ И В СИБИРИ!

В Новосибирске открылось представительство торговой марки «Актаком»!

- Работа с офисом, расположенным в Новосибирске;
- Бесплатная доставка товара по Новосибирску;
- Оборудование как в наличии на складе в Новосибирске, так и под заказ;
- Возможность бесплатного заказа каталогов продукции «Актаком»;
- Теперь можно убедиться в преимуществах наших приборов с помощью демонстрационного стенда, расположенного в нашем офисе!

ООО «АКТАКОМ Сибирь» 630049,
 г. Новосибирск, ул. Линейная, 28, оф. 413
 тел.: +7 (383) 286-56-05 факс: +7 (383) 226-55-97
info@aktakom-siberia.ru www.aktakom-siberia.ru

ПРИХОДИМ ТУДА, ГДЕ НАС ЖДУТ!