

ИСТОЧНИКИ-ИЗМЕРИТЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА КОМПАНИИ KEITHLEY ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МОЩНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Перевод под редакцией **С.Скворцова, к.т.н.** skvortsov@rodnik.ru

Использование электронных систем управления и преобразования мощности в промышленности – в аппаратуре генерации электроэнергии, промышленных электроприводах, устройствах управления, – а также на транспорте и в информационных системах привело к ужесточению требований к средствам проектирования и тестирования мощных полупроводниковых приборов. Измерение характеристик этих приборов необходимо не только на этапе испытаний, но и при разработке конечных изделий, чтобы учесть особенности электронных компонентов в процессе проектирования. Для этих целей компания Keithley выпускает источники-измерители (Source Measure Units, SMU), объединяющие в одном корпусе источники и измерители тока и напряжения. В статье описаны методы испытаний мощных полупроводниковых приборов, проблемы и пути их решения при помощи источников-измерителей.

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МОЩНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Наиболее часто применяемое устройство в системах управления энергопитанием – импульсный источник питания. Его простейшая схема (рис.1) содержит активный элемент, например, МОП-транзистор VT, диод VD, и пассивные элементы, в том числе индуктивность L и конденсатор C. Часто для гальванической развязки входа и выхода в схему также включают трансформатор. Чтобы получить требуемое выходное напряжение, на полупроводниковый ключ VT подаются импульсы управляющего напряжения с заданной скважностью. При оценке КПД устройства важно знать потери на переключение

и падение напряжения на открытом и закрытом ключе. Эти параметры удобно измерять при помощи SMU.

Некоторые полупроводниковые приборы, например тиристоры, используются для защиты схем от перегрузок. Для этого они должны отпираться при определенных значениях напряжения, выдерживать заданное напряжение и потреблять минимальный ток. Для испытания таких приборов требуется мощная измерительная аппаратура.

К обсуждаемым в статье статическим параметрам мощных полупроводниковых приборов относятся параметры, которые определяют поведение прибора в открытом (ON) и закрытом (OFF) состояниях (см. таблицу). Во многих методах

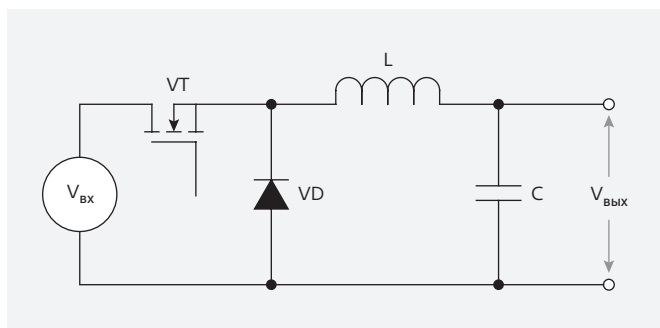


Рис.1. Типовая схема импульсного источника питания

тестирования требуется применение нескольких SMU. Программное обеспечение (ПО) ACS Basic Edition компании Keithley существенно упрощает настройку и синхронизацию измерительного стенда и обеспечивает сбор данных со всех SMU. В отличие от других программ, ПО ACS Basic Edition разработано специально для измерения характеристик полупроводниковых приборов и содержит готовые библиотеки тестов для различных изделий. Благодаря этому основное внимание можно уделять не конфигурированию источников-измерителей, а анализу результатов измерений.

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В ОТКРЫТОМ СОСТОЯНИИ

Для измерения характеристик приборов в открытом состоянии обычно применяется сильноточная система, способная обеспечивать питание

прибора и измерение его параметров при малых значениях напряжения. При испытаниях трехвыводного прибора для подачи управляющего напряжения применяется второй SMU. Типовая конфигурация системы для измерения параметров мощного МОП-транзистора в открытом состоянии приведена на рис.2. SMU, используемые для испытания мощных полупроводниковых приборов, обычно рассчитаны на диапазон постоянного тока от -1,5 до 1,5 А и импульсного тока от -10 до 10 А. При испытании сильноточных приборов для генерации импульсных токов до 100 А можно параллельно включать два мощных SMU 2651А.

Рассмотрим подробнее конфигурацию измерительной схемы и проблемы измерения некоторых параметров приборов в открытом состоянии.

Выходные параметры

Одна из основных характеристик транзистора – его выходная характеристика, отражающая связь между значениями выходного тока и напряжения. Семейство выходных характеристик мощного БТИЗ показано на рис.3.

Поскольку при тестировании мощных транзисторов возможен их нагрев, влияющий на измеряемые характеристики, оно обычно проводится в импульсном режиме. Импульсный режим требует прецизионной синхронизации моментов подачи напряжения и измерения. Для этого перед началом измерений изучается отклик прибора на одиночный импульс.

Параметры современных мощных полупроводниковых приборов, измеряемые при помощи SMU компании Keithley

Состояние прибора	Измеряемые параметры мощных полупроводниковых приборов*					Параметры SMU компании Keithley при измерении ВАХ***
	Диоды	МОП-транзисторы	Биполярные транзисторы	БТИЗ**	Тиристоры, симисторы	
Открытое	V_F-I_F	$V_{DS}-I_D$ V_{TH} $V_{GS}-I_D$ $R_{DS(on)}$	$V_{CE}-I_C$ Кривая Гуммеля	$V_{CE}-I_C$ $V_{GE}-I_C$	V_T I_H I_L	Напряжение: от -40 до 40 В Ток: до 100 А (в импульсе)
Закрытое	IR	I_{GSS} I_{DSS} BV_{DSS} BV_{DG}	I_{CEO} I_{CES} BV_{CES} BV_{CEO} BV_{CBO}	I_{CEO} I_{CES} BV_{CES} BV_{CEO}	V_{bo} V_{DRM} V_{RRM}	Напряжение: от -3 до 3 кВ Ток: от 1 фА

* См. пояснения в тексте.

** Биполярные транзисторы с изолированным затвором.

*** Вольтамперная характеристика.

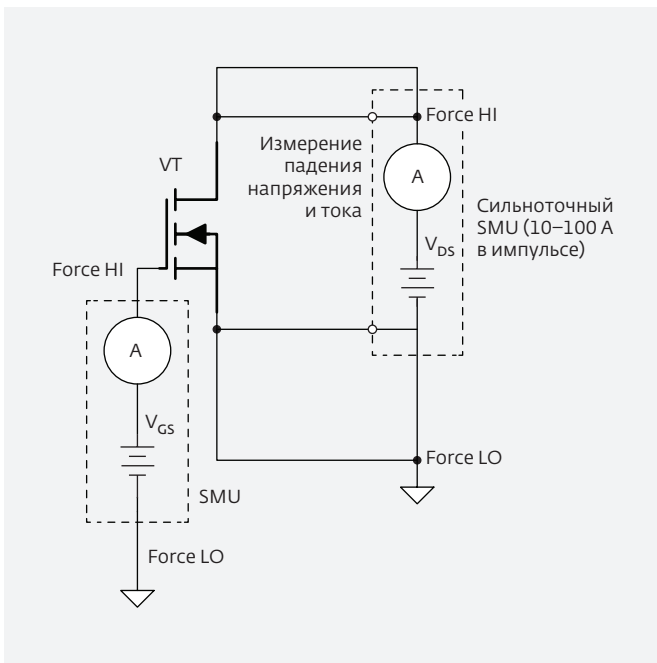


Рис.2. Типовая схема измерения характеристик мощных полупроводниковых приборов в открытом состоянии. Force HI, Force LO – выходы SMU высокого и низкого уровня соответственно

Изучение полученной переходной характеристики позволяет выбрать нужные значения времени задержки источника и измерителя, с тем чтобы измерения выполнялись после завершения переходных процессов. Регистрацию переходных характеристик транзисторов по току и напряжению обеспечивают быстродействующие аналого-цифровые преобразователи (АЦП), входящие в состав мощных SMU серии 2650A. Возможности ПО ACS Basic Edition 2.0 позволяют формировать и регистрировать импульсы тока и напряжения, а также определять требуемые задержки. Так, в примере, приведенном на рис.4, измерение тока БТИЗ следует начинать через 100 мкс после подачи импульса напряжения на коллектор.

Мощные полупроводниковые приборы имеют, как правило, высокий коэффициент передачи и большую крутизну передаточных характеристик. При измерении их параметров возможны ошибки из-за выбросов тока и напряжения. Наличие таких выбросов легко определяется с помощью быстродействующих АЦП SMU серии 2650A и ПО ACS Basic Edition. Для уменьшения этих выбросов в цепь затвора МОП-транзистора или БТИЗ можно последовательно включить резистор. Это, в частности, предусмотрено в конструкции держателя компонентов 8010 компании Keithley.

Падение напряжения на открытом ключе

Падение напряжения на полупроводниковом приборе в открытом состоянии (прямого напряжения мощного диода V_F , напряжения насыщения биполярного транзистора или V_{CEsat} для БТИЗ, напряжения тиристора в открытом состоянии V_T) непосредственно определяет его потери на электропроводность. Мощность потерь равна произведению падения напряжения на ток нагрузки. Производители полупроводниковых приборов, как правило, предпочитают измерять зависимости падения напряжения в открытом состоянии и мощности потерь от температуры и тока. Для этого широко используются источники-измерители компании Keithley.

Чтобы измерить падение напряжения на открытом ключе, SMU программируют для работы в режиме генерации тока и измерения напряжения. МОП-транзистор или БТИЗ открывается с помощью второго SMU малой мощности. Измерение характеристик мощных полупроводниковых приборов в открытом состоянии часто проводят в импульсном режиме, чтобы избежать изменения параметров в результате нагрева ключа постоянным током. Точность измерения падения напряжения на открытом ключе зависит от скорости измерения и качества кабелей и разъемов. Скорость измерения влияет на тепловую составляющую погрешности. Так, изменение температуры мощного диода на несколько градусов приводит к изменению падения напряжения на несколько милливольт. Быстродействующие АЦП SMU 2651A позволяют проводить точные измерения напряжения с шагом дискретизации 1 мкс и длительностью импульсов тока 100 мкс.

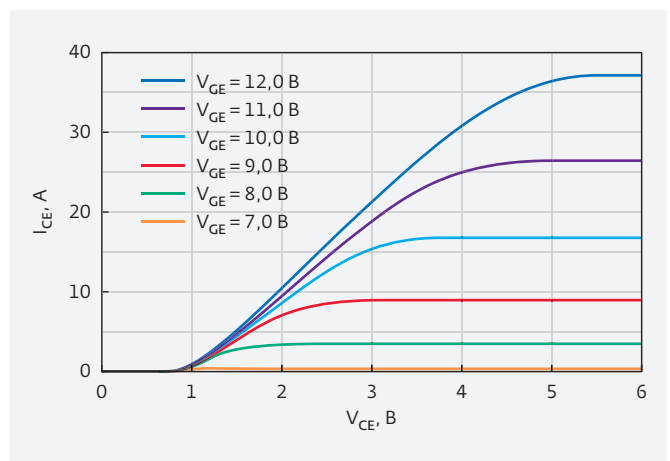


Рис.3. Выходные характеристики мощного серийного БТИЗ, измеренные с помощью ПО ACS Basic Edition

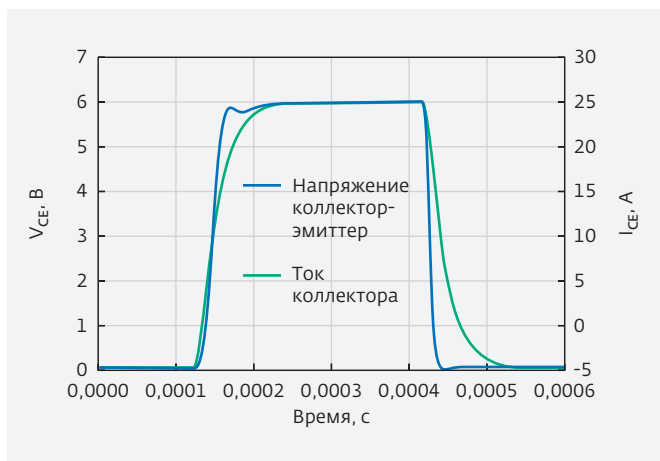


Рис.4. Измерение переходных процессов в цепи коллектора

Типичные значения тока мощных биполярных транзисторов и БТИЗ лежат в диапазоне от 100 мА до десятков ампер, а падение напряжения в открытом состоянии составляет, как правило, 1-3 В. Тиристоры представляют собой идеальные приборы для систем повышенной мощности, поскольку их напряжение в открытом состоянии мало (<2 В), а ток может превышать 100 А. При испытаниях такие большие токи могут привести к существенному падению напряжения на выводах прибора и соединительных проводах и, следовательно, к увеличению погрешности измерения напряжения. Четырехпроводные схемы соединения позволяют избавиться от большинства погрешностей за счет подключения вольтметра с помощью отдельной пары соединительных проводов. Ток, протекающий по этим проводам, очень мал и практически не приводит к падению напряжения на участке цепи вольтметр-тестируемый прибор.

Применение кабелей с низкой индуктивностью при испытании сильноточных приборов способствует формированию импульсов с малыми значениями времени нарастания и спада, благодаря чему увеличивается число измерений за время действия импульса. Мощные SMU 2651A поставляются со специализированными кабельными принадлежностями с малыми сопротивлением и индуктивностью, позволяющими генерировать импульсы тока до 50 А длительностью от 100 мкс.

Передаточные характеристики

Передаточные характеристики полупроводникового прибора позволяют определить его крутизну и, следовательно, параметры по току. Кроме того, они косвенно определяют инерционность и потери

на переключение. Чтобы установить влияние температуры на максимальный ток, часто исследуется температурная зависимость передаточных характеристик.

Для их измерения требуются два SMU: один для плавного увеличения напряжения на управляющем входе, а второй для задания напряжения на выходе и измерения выходного тока. К типичным передаточным характеристикам относятся зависимости тока стока МОП-транзистора от напряжения на затворе ($V_{GS}-I_D$), тока коллектора БТИЗ от напряжения на затворе ($V_{CE}-I_C$) и кривые Гуммеля биполярного транзистора ($V_{BE}-I_C, I_B$).

В некоторых случаях необходимо измерять ток в широком диапазоне, например, при снятии кривых Гуммеля для биполярных транзисторов, когда ток изменяется на несколько порядков. В таких случаях целесообразно проводить измерения с помощью SMU 2651A, который рассчитан на диапазон от нескольких наноампер до 50 А (рис.5).

Сопротивление транзистора в открытом состоянии

Показатели качества мощного МОП-транзистора – сопротивление в открытом состоянии $R_{DS(on)}$ и заряд затвора Q_C . Сопротивление мощного МОП-транзистора в открытом состоянии – основной параметр, определяющий мощность тепловых потерь, равную произведению тока стока I_D на сопротивление открытого канала $R_{DS(on)}$. В новейших приборах $R_{DS(on)}$ не превышает десятков миллиом при больших выходных токах. Это требует очень точного измерения падения напряжения.

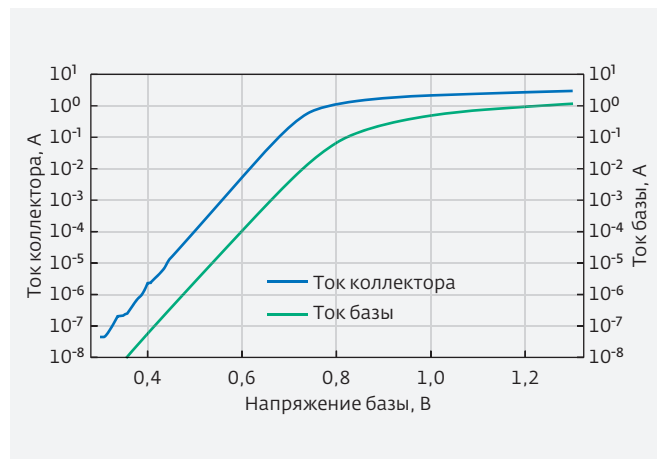


Рис.5. Кривая Гуммеля для мощного биполярного транзистора, полученная с помощью SMU 2651A (измерение тока коллектора) и 2636B (измерение тока базы)

Для измерения сопротивления открытого канала необходимы два SMU: один для подачи отпирающего напряжения на затвор и второй для формирования импульса тока стока и измерения падения напряжения. Сопротивление открытого канала $R_{DS(on)}$ вычисляется по закону Ома на основе заданного тока стока и измеренного напряжения сток-исток. Эти вычисления могут выполняться автоматически имеющимися программными средствами. Программное обеспечение позволяет синхронизировать и ступенчато изменять постоянное напряжение или амплитуду импульсов для регистрации характеристики за один проход (рис.6).

При измерении $R_{DS(on)}$ силовых приборов для формирования токов до 100 А можно использовать два параллельно включенных SMU 2651A. Настройкой и синхронизацией обоих SMU, а также сбором данных управляет ПО ACS Basic Edition. Сопротивление открытого канала возрастает с увеличением напряжения пробоя. Поэтому после любых изменений технологии изготовления прибора с целью увеличения напряжения пробоя, необходимо контролировать сопротивление открытого канала.

ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В ЗАКРЫТОМ СОСТОЯНИИ

Для определения эффективности изделия в целом следует изучить влияние закрытого ключа (транзистора, тиристора) на функционирование схемы. Измерение параметров силовых приборов в закрытом состоянии, как правило, требует применения высоковольтных измерительных приборов, способных подавать на закрытый ключ напряжения

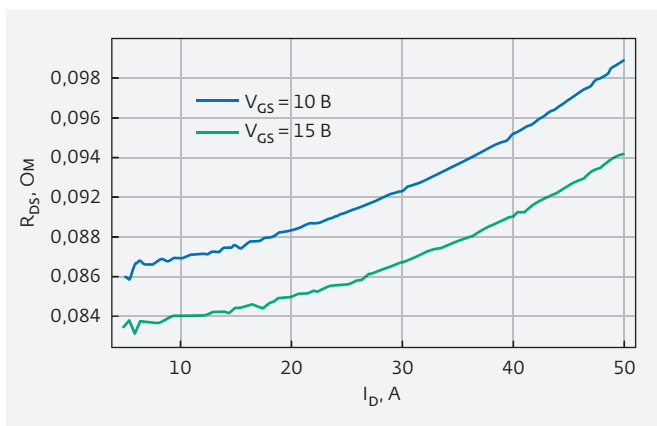


Рис.6. Зависимость сопротивления открытого канала $R_{DS(on)}$ мощного МОП-транзистора от тока стока I_D для двух значений напряжения на затворе V_{GS}

в сотни или тысячи вольт и измерять малые токи. При измерении характеристик в закрытом состоянии обычно используются два вывода силового прибора независимо от их общего числа, поэтому для выполнения измерений достаточно одного SMU. Однако для принудительного закрывания ключа или для дополнительной нагрузки определенных выводов может использоваться еще один SMU. При тестировании мощных полупроводниковых приборов в закрытом состоянии удобно использовать измерительные приборы компании Keithley, перекрывающие широкий диапазон напряжений и токов. Так, SMU 2635B и 2636B позволяют проводить тестирование при напряжениях до 200 В и токах на уровне фемтоампер, а диапазон напряжений модели 2657A достигает 3 кВ при высокой точности воспроизведения и измерения малых токов.

Для закрытого ключа измеряются два основных параметра по постоянному току: напряжение пробоя и ток утечки. Рассмотрим эти параметры.

Напряжение пробоя

Напряжение пробоя в закрытом состоянии определяет максимальное напряжение, которое может быть подано на полупроводниковый прибор. Для разработчиков представляют интерес прежде всего напряжение пробоя сток-исток МОП-транзистора и напряжение пробоя коллектор-эмиттер биполярного транзистора. Для закрывания канала МОП-транзистора затвор может быть закорочен или переведен в состояние "жесткого" отключения подачей отрицательного смещения на n-канальный прибор или положительного смещения на p-канальный прибор. Измерение напряжения пробоя можно выполнить с помощью одного или двух SMU. Источник-измеритель меньшей мощности подключают к затвору для закрывания транзистора. При этом на затвор может быть подано нулевое или другое заданное пользователем напряжение смещения. Высоковольтный источник-измеритель, например 2657A, принудительно формирует ток стока и измеряет напряжение сток-исток (рис.7).

Напряжения пробоя большинства МОП-транзисторов превышают значения, указанные в техническом паспорте на эти приборы. Так, из графиков, приведенных на рис.7, следует, что напряжение пробоя испытуемого мощного МОП-транзистора, рассчитанного по паспорту на 600 В, на самом деле составляет 680 В. Поэтому при программировании SMU задаваемое предельное напряжение стока должно превышать паспортное

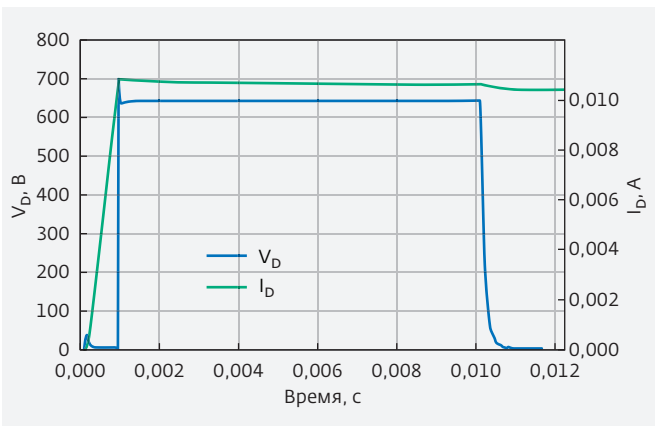


Рис.7. Зависимости тока стока I_D и напряжения сток-исток V_D при измерении напряжения пробоя мощного МОП-транзистора в импульсном режиме, полученные с помощью SMU модели 2657A. Шаг дискретизации синхронных АЦП – 10 мкс

значение напряжения пробоя. Кроме того, по мере приближения напряжения сток-исток к значению пробоя характер изменения токов и напряжений измеряемого прибора начинает меняться. В таких случаях целесообразно использовать быстродействующие АЦП, входящие в состав SMU серии 2650A и позволяющие без применения дополнительной аппаратуры одновременно получать представление о переходных процессах по току и напряжению.

Другой способ определения напряжения пробоя заключается в подаче напряжения на интересующие выводы (например, сток-исток МОП-транзистора) и измерении протекающего тока. За напряжение пробоя принимается напряжение, при котором ток превышает заданное пороговое значение, например 1 мА. Для предотвращения выхода тестируемого прибора из строя необходимо ограничивать максимальный ток. В отличие от обычных измерителей вольтамперных характеристик и источников питания, в SMU компании Keithley имеются встроенные программные средства, быстро и точно ограничивающие входные и выходные напряжения и токи. Как и у любого прибора защиты, постоянная времени цепи управления SMU ограничена. У некоторых полупроводниковых приборов пробой наступает чрезвычайно быстро, а их полное сопротивление за очень короткий период изменяется на несколько порядков. Если пробой может наступить быстрее реакции SMU, рекомендуется применять последовательные резисторы, ограничивающие максимальный ток прибора.

При работе с высоковольтными полупроводниковыми приборами обеспечение безопасности должно быть одним из важнейших условий проведения испытаний. Необходимо учитывать напряжения всех выводов, разъемов и кабелей. Например, SMU компании Keithley имеет плавающий нулевой потенциал, так как общий электрод измерительной цепи не подключен к защитному заземлению. Если пользователь принудительно не соединил общий электрод измерительной цепи и SMU с защитным заземлением и при этом напряжение в цепи превышает 42 В, то для всех выводов SMU следует применять те же меры предосторожности, что и при работе с высоким напряжением.

При выборе измерительной системы важно обеспечить защиту оператора от электрического удара. Одно из основных средств защиты – защитный экран, окружающий испытываемый прибор и соединительные цепи. Держатель компонентов 8010 компании Keithley обеспечивает безопасность при тестировании корпусированных мощных полупроводниковых приборов при напряжениях до 3 кВ. Совместное использование защитного экрана и защитной блокировки минимизирует риск электрического удара при выполнении пользователем переключений. Подключенная должным образом защитная блокировка SMU обеспечивает отключение опасного напряжения при размыкании цепи блокировки, например, при открывании крышки держателя компонентов или кожуха зондовой установки. Помимо защиты оператора, необходимо учитывать взаимодействие всех устройств, подключенных к выводам прибора. Так, выход из строя мощного транзистора при измерении его напряжения пробоя может привести к появлению высокого напряжения на измеряемом низковольтном SMU, подключенном к управляющему выводу. Для таких случаев держатель компонентов 8010 компании Keithley имеет встроенную защиту низковольтных SMU.

Ток утечки

Ток утечки – это ток, который протекает в цепи закрытого ключа. Он влияет на значение тока потребления конечного изделия в режиме ожидания. В большинстве случаев ток утечки зависит от температуры и напряжения на выводах закрытого ключа, к которым подключен измерительный прибор. Уменьшение тока утечки позволяет свести к минимуму потери мощности на закрытом ключе. При работе транзистора или диода в ключевом или выпрямительном режиме необходимо эффективно

закрывать ключ. Чем меньше ток утечки, тем лучше прибор выполняет свою функцию.

При испытании полупроводниковых приборов в закрытом состоянии требуется измерять токи утечки затвора и стока (или истока). Для мощных приборов значения этих токов обычно лежат в диапазоне нано- или микроампер и могут быть измерены с помощью высокочувствительных SMU компании Keithley. Это особенно ценно при испытании приборов, выполненных на основе широкозонных материалов, таких как карбид кремния, нитрид галлия и нитрид алюминия, напряжение пробоя которых больше, а токи утечки меньше, чем у кремниевых приборов. На рис.8 приведена зависимость тока стока от напряжения стока для серийно выпускаемого мощного SiC МОП-транзистора в закрытом состоянии.

Для точного измерения малых токов необходимы триаксиальные кабели, имеющие дополнительный охранный экран (Guard). Такой экран отводит токи утечки от измерительной цепи и тем самым практически исключает их влияние на результаты измерений. Охранное экранирование уменьшает длительность переходных процессов в высоковольтных цепях, устраняя необходимость перезарядки межэлектродной емкости кабеля. Использование тестовой оснастки или зондовой системы с охранным экранированием позволяет повысить качество измерений полупроводниковых приборов*. Компания Keithley поставляет триаксиальные кабели и разъемы для всех SMU, предназначенных для измерения малых токов, таких как 2636B и 2657A. Специализированные высоковольтные триаксиальные кабели для SMU 2657A позволяют выполнять измерения тока с разрешением 1 фА при напряжении до 3 кВ. Держатель компонентов 8010 обеспечивает защитное экранирование всей измерительной цепи.

Еще одна мера, необходимая при измерении малых токов, – это электростатическое экранирование, обеспечиваемое металлическим кожухом, окружающим измеряемый прибор и схему соединений. Для шунтирования электростатических зарядов такой экран соединяется с общим электродом измерительной цепи. В держателе компонентов 8010 функцию электростатического экрана выполняет металлический корпус.

И, наконец, достоверность результатов измерения малых токов зависит от времени переходных процессов в цепи: при его увеличении погрешность

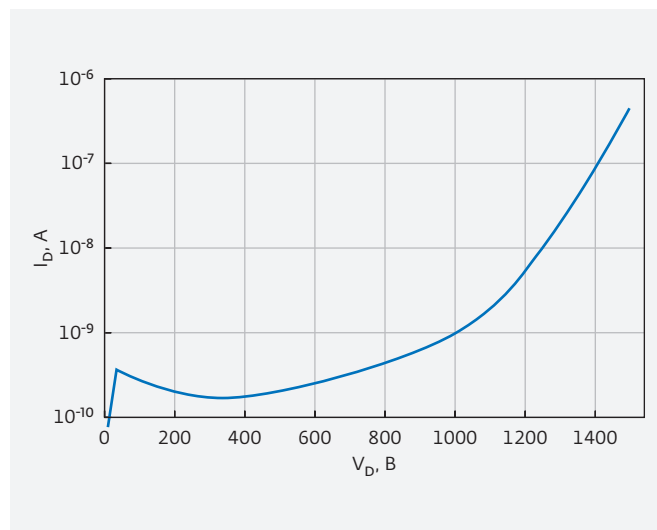


Рис.8. Типовая зависимость тока стока I_D от напряжения стока V_D мощного транзистора в закрытом состоянии

возрастает. В аппаратуре Keithley для достижения хороших результатов измерений предусмотрено автоматическое задание времени задержки, учитывающее длительность переходных процессов в измерительной цепи. Однако для учета произвольной емкости, нескомпенсированной схемой охранный экранирования, измерения постоянной времени можно выполнять путем ступенчатого изменения напряжения и регистрации тока. Результаты этих измерений следует использовать для установки дополнительных задержек источника и измерителя с целью обеспечения достоверности результатов испытаний полупроводниковых приборов.

Источники-измерители производства компании Keithley в комплекте с ПО ACS Basic Edition представляют собой законченное техническое решение для тестирования мощных полупроводниковых приборов. ПО ACS Basic Edition содержит обширную библиотеку готовых процедур тестирования мощных корпусных приборов, в том числе полевых и биполярных транзисторов, БТИЗ, диодов, резисторов и тиристоров. Кроме того, компания Keithley выпускает соответствующие кабельные принадлежности и тестовую оснастку, позволяющие выполнять безопасные, точные и надежные измерения.

Источник: Testing Power Semiconductor Devices With Kethley High Power System Source Meter SMU Instruments Application Note No 3204.

* См. в Keithley Application Note #3163, "Creating Multi-SMU Systems with High Power System SourceMeter SMU Instruments".