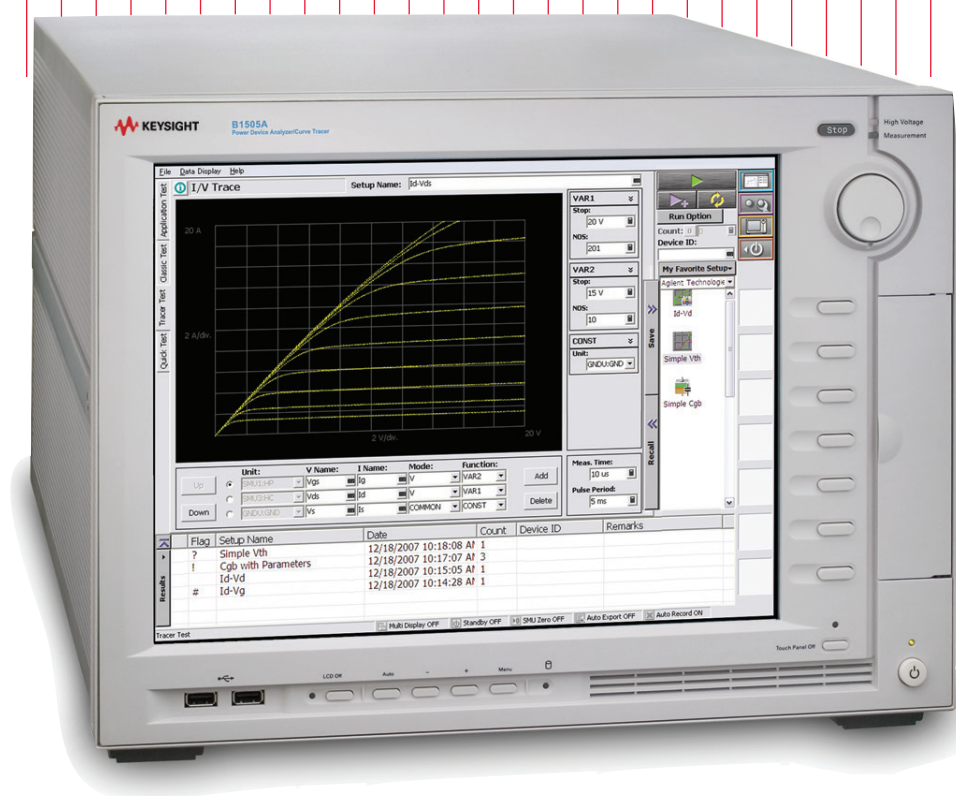


Keysight Technologies

Точное и эффективное определение характеристик силовых полупроводниковых приборов при напряжениях до 3000 В и токах до 20 А

B1505A Анализатор/характериограф полупроводниковых устройств большой мощности

Рекомендации по применению



Введение

Требования по повышению энергоэффективности и снижению выбросов углерода в атмосферу требуют точного определения характеристик силовых полупроводниковых устройств. Для достижения более высоких уровней напряжения и снижения уровня сопротивления в открытом состоянии продолжается совершенствование структуры самих устройств, а также технологий, применяемых в производственных процессах, изучаются свойства новых широкозонных полупроводниковых материалов (WBG), таких как карбид кремния (SiC) и нитрид галлия (GaN). Для удовлетворения всех этих актуальных потребностей требуется измерительный прибор, способный работать с высокими напряжениями и токами.

Для определения характеристик силовых полупроводниковых устройств традиционно использовались характериографы, однако особенность приборов этого типа – невысокая точность измерения напряжения и тока, а также недостаточное разрешение при измерении низких токов. Параметрические анализаторы, примером которых является выпускаемый компанией Keysight Technologies прибор модели B1500A, обладают очень высокой точностью измерения напряжения и тока, но ширины их диапазона измерений недостаточно для надлежащей оценки характеристик полупроводниковых приборов большой мощности. Для решения данных проблем Keysight Technologies предлагает анализатор/характериограф полупроводниковых устройств большой мощности модели B1505A. Он представляет собой простое в использовании решение в одном корпусе, которое объединяет превосходную точность измерения напряжения и тока, достаточное разрешение при измерении малых токов, а также возможность измерения больших напряжений и токов. Новый модуль высоковольтного источника/измерителя (HVSMU), предназначенный для работы в составе анализатора B1505A, способен обеспечивать напряжение величиной до 3000 В, а новый модуль источника/измерителя большой силы тока (HCSMU) обеспечивает токи силой до 20 А.

В анализаторе B1505A также предусмотрена поддержка многочастотного измерителя емкости (MFCMU), который позволяет измерять емкость в частотном диапазоне от 1 кГц до 5 МГц. Кроме того, B1505A поддерживает использование тройников смещения, которые применяются совместно с модулями высоковольтного источника/измерителя (HVSMU) и позволяют выполнять измерения емкости при напряжениях смещения до 3000 В.

Программное обеспечение Keysight EasyEXPERT, которое установлено на анализаторах B1500A и B1505A, обеспечивает удобное управление на базе графического интерфейса. Впечатляющие возможности программы EasyEXPERT в области автоматического анализа, обработки графической информации и преобразования данных позволили создать полнофункциональное решение для определения и анализа характеристик полупроводниковых устройств большой мощности. Использование ПО EasyEXPERT устраняет необходимость разработки собственного управляющего программного обеспечения и отдельного конфигурирования измерительных приборов в составе пользовательского комплекта или пакетной системы.

В данных рекомендациях по применению описаны основные преимущества анализатора модели B1505A, а также приведены примеры практического выполнения измерений. В документе приведены характеристики силовых МОП-транзисторов и биполярных транзисторов большой мощности, а также полупроводниковых устройств, созданных с применением уникальных современных материалов.

Основные преимущества анализатора B1505A

The B1505A has many features that culminate in the following key benefits:

- Комплексное решение всех задач, связанных с определением характеристик полупроводниковых устройств большой мощности
- Повышенная производительность и возможность автоматизации процесса измерений
- Простота извлечения и анализа данных (как в числовой, так и в графической форме)

Комплексное решение по определению характеристик полупроводниковых устройств большой мощности

Для повышения эффективности использования энергии в электрическом и электронном оборудовании, в котором применяются такие силовые компоненты, как диоды и транзисторы большой мощности, следует сосредоточиться на трех ключевых направлениях: увеличение допустимого высокого напряжения, уменьшение сопротивления в открытом состоянии, а также снижение паразитной емкости. Эти характеристики очень важны, поскольку влияют на скорость коммутации цепи, что в свою очередь является одним из ключевых методов, применяемых при проектировании силовых цепей с целью снижения потребления энергии и повышения эффективности ее использования. К сожалению, с точки зрения разработки устройств большой мощности, эти характеристики конфликтуют друг с другом. Во многих случаях это означает, что устройство для целевого применения проектируется методом проб и ошибок, то есть требует повторных циклов проектирования.

Для эффективной и точной оценки характеристик силового полупроводникового устройства критически важными являются следующие измерительные возможности:

- Возможности измерения высокого напряжения с большой точностью для определения величины напряжения пробоя
- Возможности создания больших токов, а также высокоточного измерения малых значений токов для определения величины сопротивления в открытом состоянии
- Возможность точного измерения вольт-фарадной характеристики при смещениях под действием постоянного напряжения в диапазоне от нуля до максимальной величины номинального напряжения

Для измерения напряжения пробоя необходимо, чтобы измерительное оборудование как минимум обеспечивало напряжения, достигающие уровня пробоя исследуемого полупроводникового прибора. Например, для кремниевых полевых МОП-транзисторов большой мощности напряжение пробоя составляет более 1500 В, а полупроводниковые приборы, изготовленные из новых материалов, таких как карбид кремния, могут иметь напряжение пробоя более 2000 В. Это означает, что измерительное оборудование должно обладать способностью генерировать напряжения, превышающие 2000 В. Кроме того, во время измерений напряжения пробоя необходимо точно контролировать величину тока утечки, поскольку для определения важных параметров прибора, например плотности расположения дефектов, необходимы подробные вольт-амперные характеристики. Традиционные характериографы способны создавать высокие напряжения, но при измерениях тока такими приборами погрешность находится на уровне десятков микроампер (мкА) для режимов переменного тока и выпрямленного переменного тока и на уровне наноампер (нА) в режиме контроля тока утечки. Такой точности измерений недостаточно для работы с новыми полупроводниковыми материалами (такими как карбид кремния или нитрид галлия), поскольку при измерении токов утечки требуется точность на уровне пикоампер (пА). Входящий в состав анализатора B1505A модуль высоковольтного источника/измерителя (HVSMU) способен обеспечивать напряжения величиной до 3000 В и измерение токов субпикоамперного уровня.

Критически важными условиями для оценки рабочих характеристик силовых устройств при протекании значительных токов являются высокая точность измерений и способность создать импульсы малой ширины. Когда через силовые полупроводниковые устройства протекают значительные токи, выделяется большое количество тепла, что может стать причиной возникновения теплового дрейфа. Значительные токи стока могут создавать канал саморазогревания в случае с полевыми МОП-транзисторами большой мощности. А канал саморазогревания снижает мобильность носителей заряда и изменяет характеристики транзистора. Импульсные измерения со смещением позволяют минимизировать этот эффект за счет снижения продолжительности рассеивания энергии, а значит, подавления процесса саморазогревания. Традиционные характериографы способны измерять напряжения уровня милливольт (мВ) с разрешением 50 мкВ, однако при этом в устройствах с низким сопротивлением в открытом состоянии (в диапазоне мОм) потребуются токи, превосходящие 1 А. Модуль источника/измерителя большой силы тока (HCSMU) поддерживает диапазон измерений напряжений в 200 мВ, что на порядок превосходит диапазон измерения амплитуды напряжения модулем HPSMU, который составляет 2 В. Это позволяет модулю HCSMU измерять напряжения микровольтном диапазоне (~100 мкВ), благодаря чему можно точно измерить сопротивления устройства в открытом состоянии на уровне миллиом (мОм).

В импульсном режиме модуль источника/измерителя большой силы тока (HCSMU) способен создавать токи до 20 А при напряжении в 20 В с минимальной шириной импульса 50 мкс (впервые в отрасли). Наличие такого импульсного режима значительно улучшает показатели, по сравнению с модулем большой силы тока (HCU) модели 4142В, минимальная ширина импульса в котором составляла 100 мкс. Благодаря своей способности создавать токи силой до 20 А в импульсном режиме (за счет чего устраняется эффект саморазогревания), анализатор модели В1505А обеспечивает стабильность и точность измерения сопротивления в открытом состоянии на субмиллиомном уровне. Этот показатель полностью отвечает требованиям, предъявляемым к измерению низких сопротивлений в открытом состоянии как существующих, так и перспективных полупроводниковых устройств. На рис. 1 показан пример измерения низкого сопротивления, выполняемого для провода. Модуль HCSMU свипирует выходной ток в диапазоне от -50 до +50 мА с шагом в 1 мА и при этом точно измеряет напряжения величиной в несколько сотен микровольт. Результатом анализа, выполненного методом регрессии, является линия, угловой коэффициент которой составляет 4,189614Е-003, что соответствует сопротивлению 4,19 мОм.

Измерения вольт-фарадной характеристики (ВФХ) обычно используются для определения паразитной емкости транзистора при моделировании устройств или в целях извлечения параметров модели, а также для определения других важных параметров полупроводникового устройства, таких как толщина пленки оксида, концентрация примесей, состояние поверхности раздела и плотность дефектов. Ранее оптимальными значениями постоянного напряжения смещения для определения характеристик кремниевых СБИС и полупроводниковых устройств малой мощности являлись ± 40 или ± 100 В.

В отличие от устройств низкой мощности, при использовании силовых полупроводниковых устройств требуется, чтобы измерения ВФХ с постоянным напряжением смещения выполнялись при максимальном допустимом значении, позволяя определить соотношение между паразитной емкостью и коммутационными свойствами. Анализатор В1505А поддерживает работу тройников смещения с высоким напряжением внешнего источника, поэтому можно совместно использовать модули высоковольтного источника/измерителя (HVSMU) и многочастотного измерителя емкости (MFCMU). При такой конфигурации прибор обеспечивает измерение ВФХ с постоянным напряжением смещения величиной до ± 3000 В и с частотами в диапазоне от 10 кГц до 1 МГц.

Анализатор В1505А представляет собой комплексное решение, которое поддерживает измерение разнообразных вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик, необходимых для полного определения свойств современных полупроводниковых устройств большой мощности.

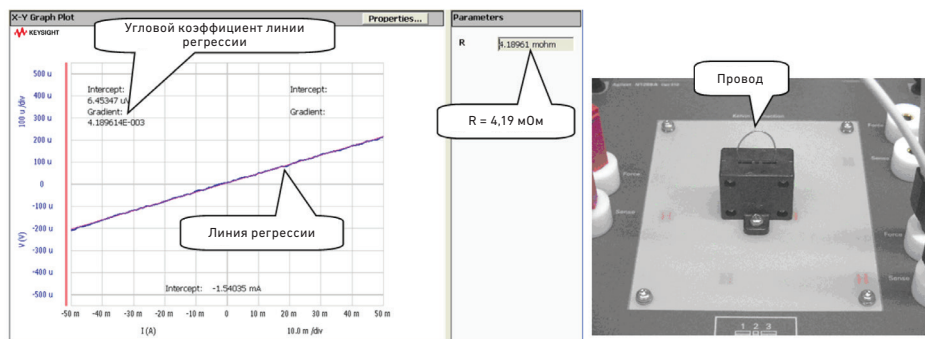


Рис. 1: Измерение низкого сопротивления на примере проводника. Угловой коэффициент линии регрессии показывает, что точные и стабильные результаты измерения сопротивления могут быть получены на уровне миллиом (мОм)

Улучшенная производительность и возможность автоматизации процесса измерений

Анализатор B1505A обладает несколькими функциями автоматизированного тестирования, которые обеспечивают улучшение производительности. Предусматривается поддержка блока селектора модулей, являющегося уникальным компонентом. С его помощью пользователь без каких-либо затруднений может осуществлять переключение между модулями источника/измерителя высокой мощности (HPSMU), высоковольтного источника/измерителя (HVSMU) и источника/измерителя большой силы тока (HCSMU) в автоматическом режиме, то есть без необходимости менять кабельные соединения. Программное обеспечение EasyEXPERT поддерживает режим быстрого тестирования, который позволяет задать последовательность выполнения тестов и их автоматическое выполнение без написания программного кода.

Полевые МОП-транзисторы высокой мощности – самые распространенные силовые устройства, для которых выполняется определение характеристик. Важными параметрами полупроводникового устройства являются напряжение пробоя, сопротивление в открытом состоянии и подпороговый ток утечки, для определения которых требуются модули HVSMU, HCSMU и HPSMU.

К сожалению, поскольку проведение каждого из указанных тестов требует использования отдельного измерительного модуля, при переходе к следующему тесту приходится изменять конфигурацию или повторно подключать тестируемое устройство к соответствующему измерительному модулю. Частое изменение подключений устройства негативно отражается на производительности процесса тестирования и создает риск повреждения устройства в случае некорректного подключения. Особенно утомительным это становится, когда работа ведется со станцией зондового контроля полупроводниковых пластин. Исходя из этого рекомендуется использовать автоматизированное переключение между модулями HVSMU, HCSMU и HPSMU.

Блок селектора модулей в составе анализатора B1505A поддерживает функцию автоматического переключения между модулями HVSMU, HCSMU и HPSMU, как показано на рис. 2. Потребуется лишь выбрать требуемый измерительный модуль, а блок селектора автоматически создаст правильные параметры переключения. Кроме того, последовательно с модулем высоковольтного источника/измерителя (HVSMU) может включаться защитный резистор сопротивлением 100 кОм, который позволит исключить случайное повреждение тестируемого устройства. Конечным результатом такой конфигурации является исключение возможности неправильных подключений и общее повышение производительности при тестировании.

Функция быстрого тестирования позволяет выполнять последовательности тестов без необходимости программирования и превращает процесс автоматизированного тестирования в простую операцию, осуществляемую одним нажатием кнопки. Совместное использование режима быстрого тестирования и блока селектора модулей обеспечивает наиболее эффективную среду тестирования, практически исключающую какие-либо ошибки. Это утверждение особенно верно при выполнении измерений с помощью полуавтоматических зондовых станций, когда анализатор B1505A и блок селектора модулей способны легко обеспечить полную автоматизацию процесса измерений по всей полупроводниковой пластине.

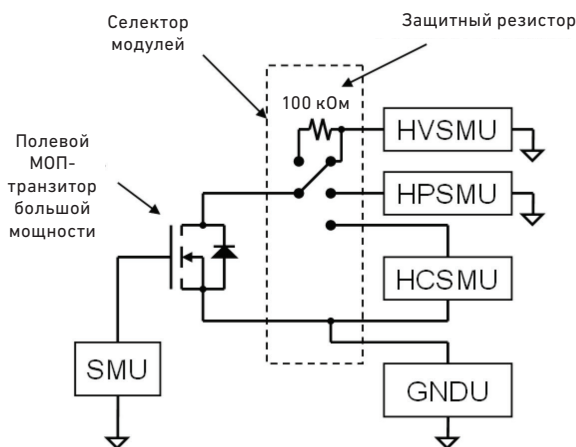


Рис. 2: Блок селектора модулей – простое в использовании средство автоматизации для различных измерительных ресурсов анализатора B1505A

Простота извлечения и анализа данных (и в числовой, и в графической форме)

Программное обеспечение EasyEXPERT обладает мощными средствами графического анализа, которые способны повысить эффективность обработки ваших данных и упростить процесс определения параметров силовых полупроводниковых устройств. В данном разделе содержатся пояснения касательно этих функций, а также показано, каким образом эти их можно использовать для уменьшения затрат времени на этапах разработки.

Популярное средство обработки данных и определения параметров – программные электронные таблицы, такие как Microsoft® Excel®, но они не всегда являются оптимальным средством для оценки характеристик силовых полупроводниковых устройств. Для демонстрации экспоненциальных зависимостей, таких как ВАХ диода, электронные таблицы создают графики в полулогарифмическом и логарифмическом форматах, но в них не поддерживается поиск данных, например функция маркера. Определить положение конкретного значения можно посредством визуального поиска, но это недостаточно эффективно при анализе данных. В отличие от электронных таблиц, в среде ПО EasyEXPERT предусмотрена функция графического маркера, который можно перемещать вдоль кривой для определения местоположения целевого значения при помощи поворотной рукоятки или колеса мыши. Значения величины, соответствующие положению маркера, отображаются в области построения графиков, как показано на рис. 3. Если включен режим интерполяции, то функция маркера обеспечит возврат интерполированного значения для указанной целевой величины. Эта схема работы может быть эффективной при определении таких параметров, как пороговое напряжение при заданной величине тока на ВАХ диода.

В обычном характериографе не предусмотрена функция построения графиков в логарифмических координатах, которая требуется для определения характеристик полупроводниковых устройств, а также функция графического анализа, необходимая для оценки параметров полупроводниковых устройств. Например, характериографы позволяют строить касательные, но при этом пользователь должен корректировать угловой коэффициент линий вручную. Это может создавать проблемы, поскольку разные пользователи будут корректировать положение касательной по-разному, результатом чего будут несогласованные данные измерений. Программа EasyEXPERT, напротив, имеет встроенные функции построения касательных линий и линий регрессии, выдавая надежные результаты, на которые не влияет субъективное восприятие наблюдателя. На рис. 3 показан пример построения двух линий регрессии для характеристики кремниевого р-п диода. Одна линия представляет процесс тепловой рекомбинации носителей – генерации тока (R-G), а вторая – ток в зонах диффузии.

Коэффициент идеальности (n), который является показателем качества кремниевого р-п перехода, рассчитывается на основании угловых коэффициентов линий при помощи пользовательских функций; два коэффициента идеальности ($n1$ и $n2$) показаны в разделе «Параметры» программного окна.

Вы можете задать аналитические операции (например, построение линий регрессии) на странице настройки автоматического анализа, что позволит вам получить результаты анализа сразу по завершении измерений. Наличие таких функций графического анализа устраняет необходимость обременительных операций по обработке данных после выполнения измерений, благодаря чему значительно повышаются производительность и эффективность процесса.

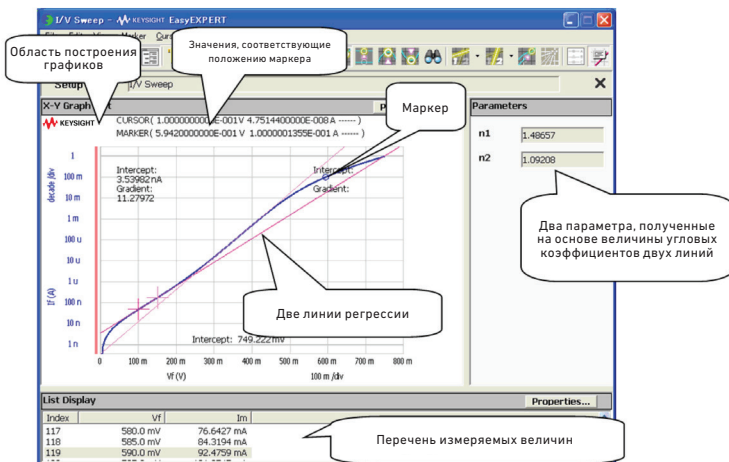


Рис. 3: Пример графического анализа ВАХ диода при помощи ПО EasyEXPERT

Определение характеристик мощных полевых МОП-транзисторов

В последующих разделах приведены примеры определения типовых характеристик мощных полевых МОП-транзисторов.

Статические характеристики Id-Vds и сопротивление на выходе

Определение статической или выходной характеристики является одним из наиболее важных и распространенных измерений, выполняемых для мощных полевых МОП-транзисторов. Это измерение обычно осуществляется путем приложения к клеммам затвора напряжения свипирования, включающего в себя и пороговое значение. Поскольку силовые МОП-транзисторы предполагают наличие значительных токов, напряжение свипирования часто подается в импульсном режиме, что позволяет уменьшить нагрев прибора. При построении графика зависимости тока стока Id от напряжения сток-исток Vds при фиксированной величине напряжения затвор-исток Vgs величина Id достигает постоянного значения (насыщения), как только величина Vgs окажется достаточно большой, чтобы обеспечить инвертирование канала.

Для анализа графиков такого типа можно использовать функции графического анализа ПО EasyEXPERT. Например, EasyEXPERT позволяет построить линию регрессии через прямоугольную область, заданную двумя положениями курсора на кривой. Угловой коэффициент или градиент этой линии будет представлять собой динамическую выходную проводимость, а ее инвертированный вариант – динамическое выходное сопротивление.

На рис. 4 показаны типовые статические характеристики Id-Vds и выходного сопротивления для мощных полевых МОП-транзисторов. Основной источник свипирования подключен к стоку прибора, и Vds изменяется в пределах от 0 до 40 В с шагом 0,4 В; вторичный источник свипирования подключен к затвору, и напряжение Vgs изменяется от 3,6 до 4,4 В с шагом 0,2 В. В ходе этого процесса выполняется измерение тока Id в каждой точке и создается ряд графиков Id-Vds (по одному для каждого значения Vgs). Функция анализа графиков обеспечивает построение линии регрессии при Id = 0,8 А, а измерение углового коэффициента этой линии позволяет определить величину динамического сопротивления, которая составляет 6777 Ом.

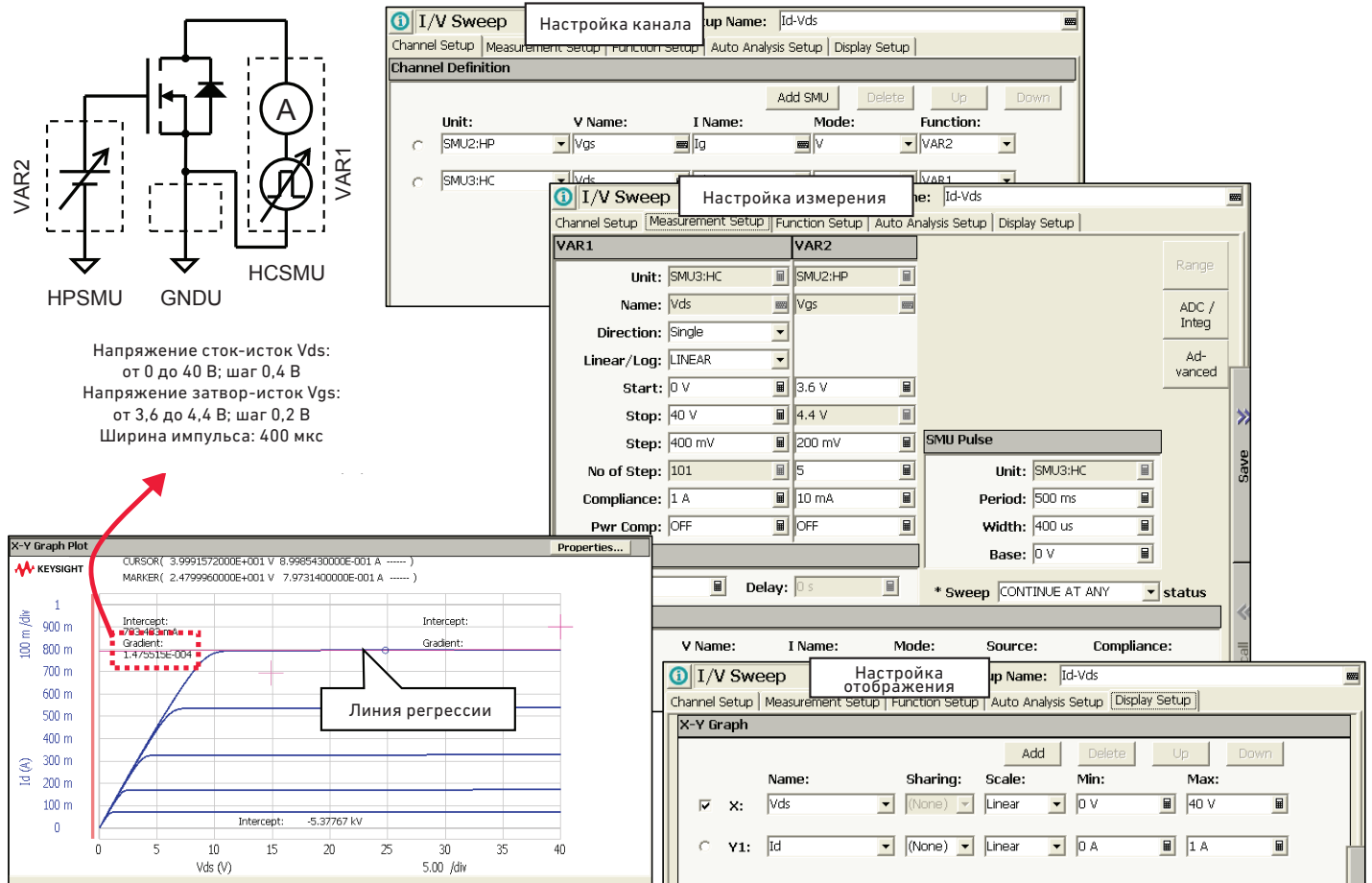


Рис. 4: Статические характеристики Id-Vds и выходного сопротивления мощного полевого МОП-транзистора

Характеристики сопротивления в открытом состоянии $R_{ds(on)}$

Еще один важный параметр полупроводникового прибора – сопротивление в открытом состоянии $R_{ds(on)}$, величина которого определяется как приложенное напряжение стока (V_{ds}), деленное на ток стока (I_d), в той области, где МОП-структура находится в открытом состоянии. Программа EasyEXPERT позволяет легко рассчитать величину R_{ds} при помощи встроенных возможностей создания пользовательских функций, как показано на рис. 5.

На рис. 5 приведен пример графика зависимости R_{ds} - V_{gs} . В импульсном режиме приложен ток стока (I_d) величиной 6 А, при этом напряжение затвора измеряется в пределах от 0 до 20 В и измеряется напряжение стока. Строится зависимость R_{ds} - V_{gs} . Когда величина V_{gs} составляет менее 4 В, сопротивление R_{ds} относительно увеличивается, поскольку МОП-транзистор открыт не полностью. Вы легко сможете считывать значения R_{ds} при помощи функции маркера.

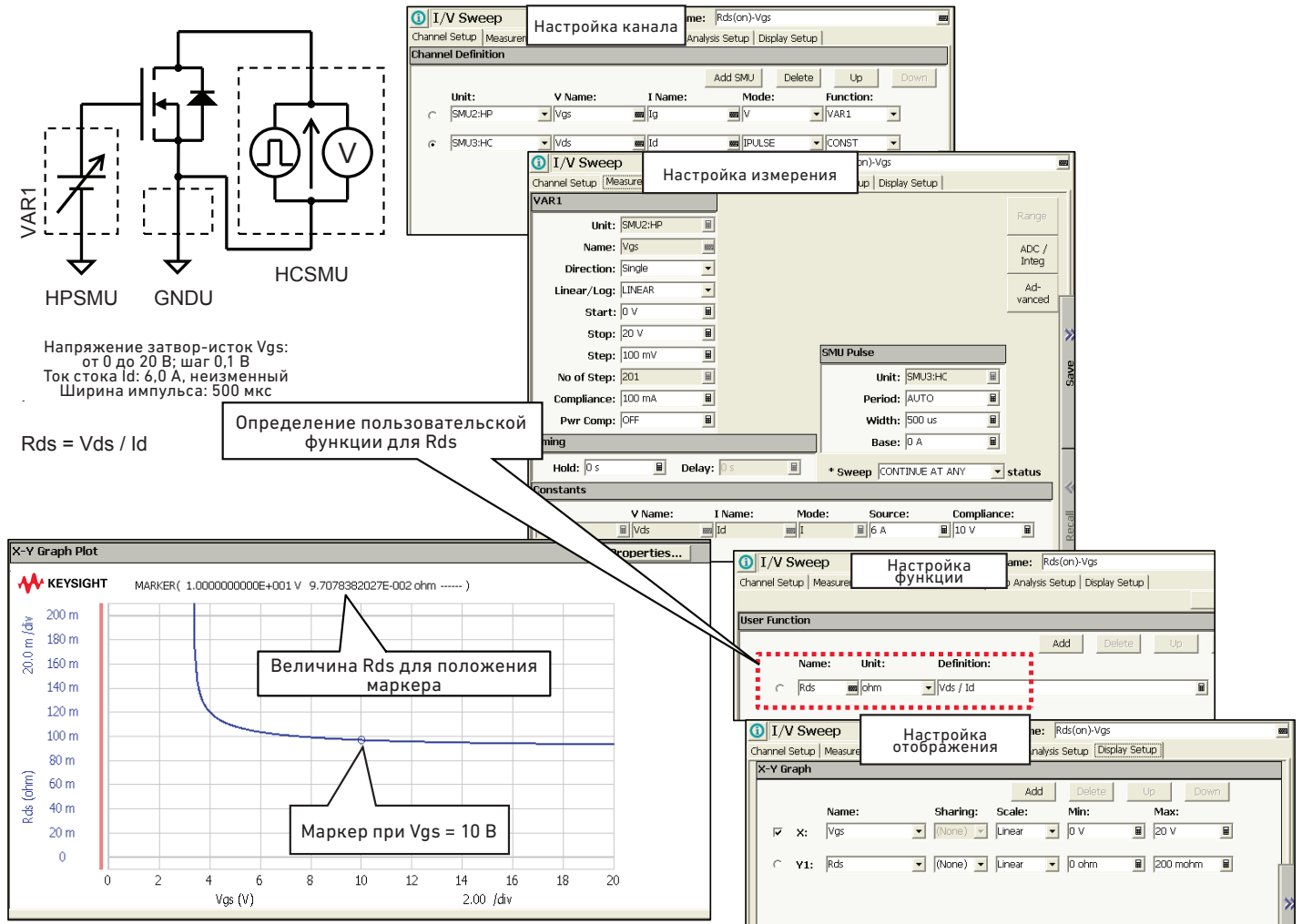


Рис. 5: Характеристики сопротивления в открытом состоянии $R_{ds(on)}$ - V_{gs} мощного полевого МОП-транзистора

Определение величины порогового значения (V_{th}) при помощи характеристик I_d - V_{gs}

Существует несколько альтернативных способов определения величины порогового напряжения (V_{th}). Самый простой – определение величины напряжения, которое соответствует заданной величине тока стока на характеристике I_d - V_{gs} . Эту задачу можно решить двумя путями: используя функцию маркера в ручном режиме для считывания значений графика I_d - V_{gs} или же посредством активации режима маркера на странице настройки автоматического анализа (Auto Analysis Setup). При использовании функции автоматического анализа маркер будет автоматически перемещаться в положение, при котором ток стока имеет указанную величину. При этом значение порогового напряжения можно будет считать на оси X.

На рис. 6 показан пример определения величины порогового напряжения V_{th} . На странице настройки автоматического анализа (Auto Analysis Setup) задано условие для маркера $I_d = 10$ мкА, а значение V_{th} извлекается при помощи функции считывания @MX (которая возвращает значение координаты X положения маркера). Результирующий график представляет зависимость I_d - V_{gs} с маркером в положении $I_d = 10$ мкА, которому соответствует величина порогового напряжения V_{th} в 2,245 В.

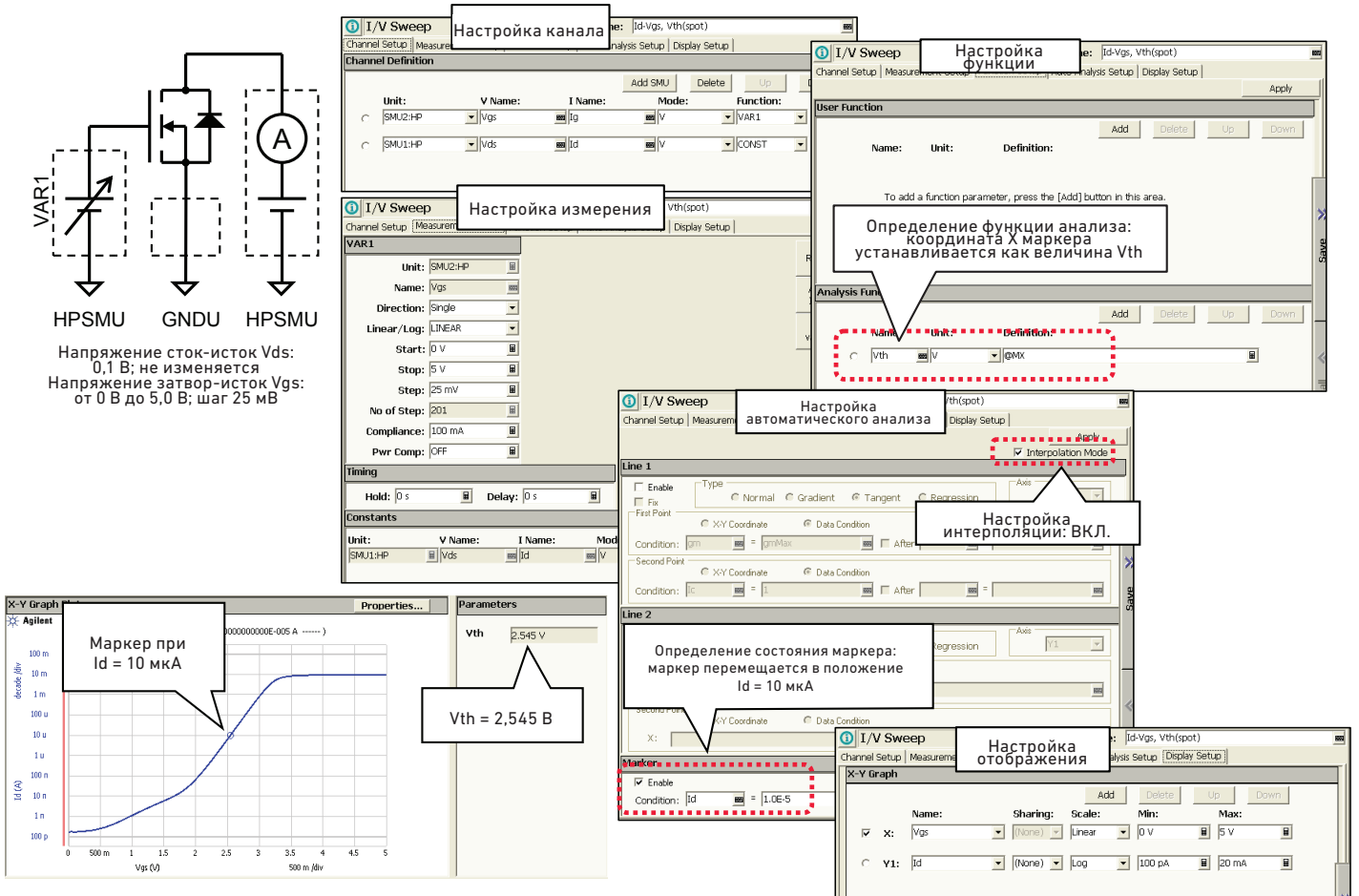


Рис. 6: Извлечение значения порогового напряжения V_{th} из характеристики I_d - V_{gs} мощного полевого МОП-транзистора с использованием заданного значения тока стока

Еще один широко распространенный метод определения порогового напряжения V_{th} предусматривает анализ линейного участка характеристики I_d - V_{gs} мощного полевого МОП-транзистора. При использовании этого метода выполняется свипирование напряжения на затворе, чтобы выполнить измерение I_d - V_{gs} в условиях, когда к стоку приложено небольшое неизменное напряжение смещения. Производная от тока стока (I_d) по напряжению на затворе (V_{gs}) носит название крутизны (g_m) и может рассчитываться в числовом виде с использованием встроенной функции дифференцирования (diff). Далее можно построить график крутизны с применением оси Y2, как показано на рис. 7. При помощи функции автоматического анализа программы EasyEXPERT маркер устанавливается в точку, где g_m имеет максимальное значение, и в этой позиции строится касательная к характеристике I_d . Пересечение этой касательной с осью X может быть рассчитано автоматически при использовании функции считывания @L1X. Далее, при помощи метода линейной экстраполяции, путем вычитания половинного значения напряжения сток-исток (V_{ds}) из координаты пересечения оси X и касательной, может быть получена оценка порогового значения V_{th} . Данный пример демонстрирует, что при помощи программы EasyEXPERT автоматический расчет и отображение результатов могут выполняться не только для измеренных параметров, но и для извлеченных характеристик (таких как g_m) и параметров (таких как V_{th}).

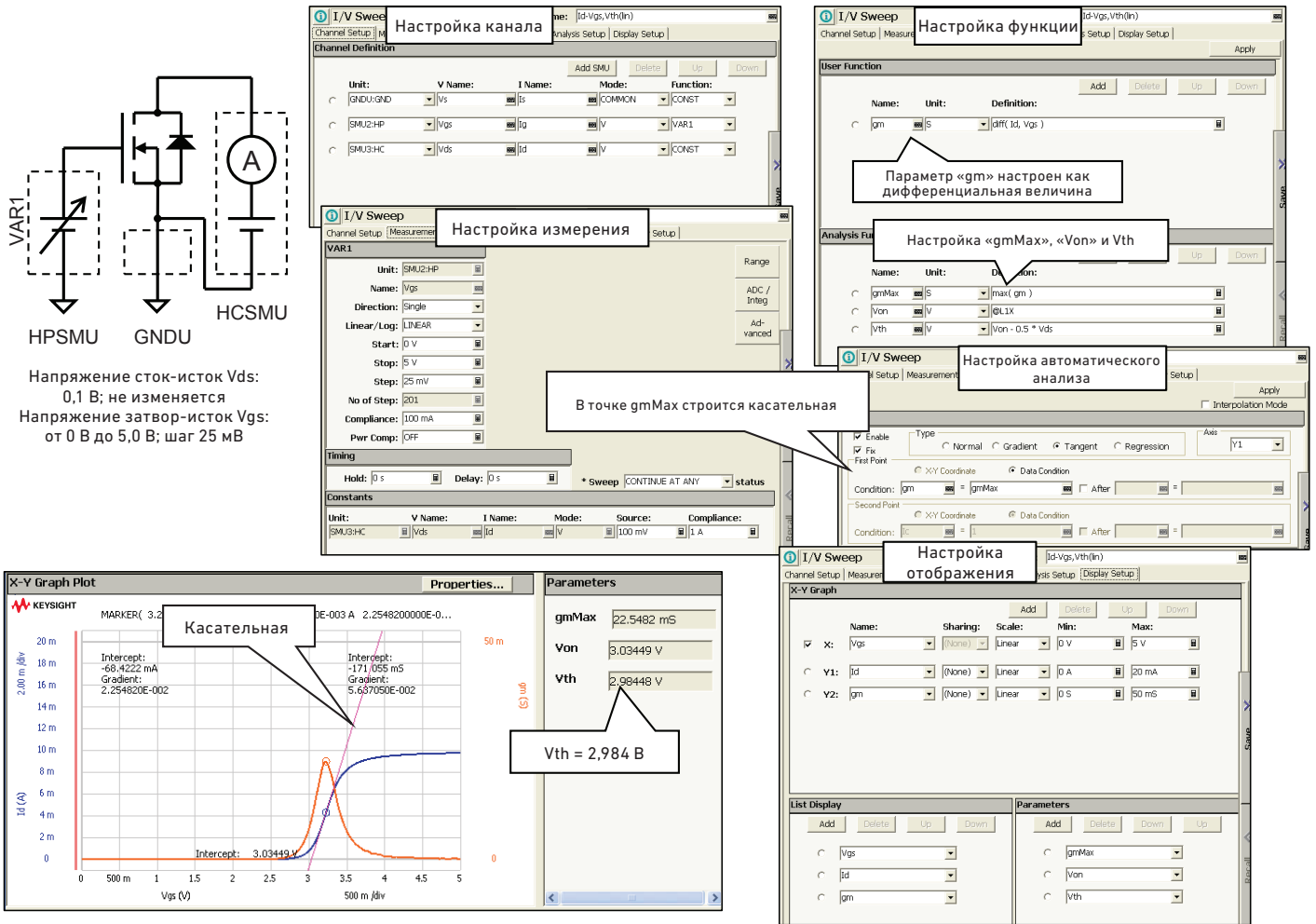


Рис. 7: Извлечение значения порогового напряжения V_{th} из характеристики I_d - V_{gs} мощного полевого МОП-транзистора путем построения касательной к характеристике I_d в точке максимальной крутизны

Определение подпорогового размаха (S) из характеристик Id-Vgs

Понимание характеристик подпороговой утечки мощного полевого МОП-транзистора важно для прогнозирования параметров его переключения. Кроме того, ток подпороговой утечки может дать информацию о нарушениях процесса и имеющихся дефектах.

Процедура определения тока подпороговой утечки несложная. Поскольку при слабой инверсии (или в подпороговом режиме) ток стока экспоненциально зависит от напряжения затвор-исток, для характеристики Id-Vgs, построенной в полулогарифмическом масштабе, в линейной области строится линия регрессии. Ее угловой коэффициент называют подпороговой крутизной, а величину, обратную этому параметру, – подпороговым размахом (S), который измеряется в вольт/декадах. Безусловно, весь этот процесс можно автоматизировать с помощью автоматического анализа и страниц настройки функции, как показано на рис. 8.

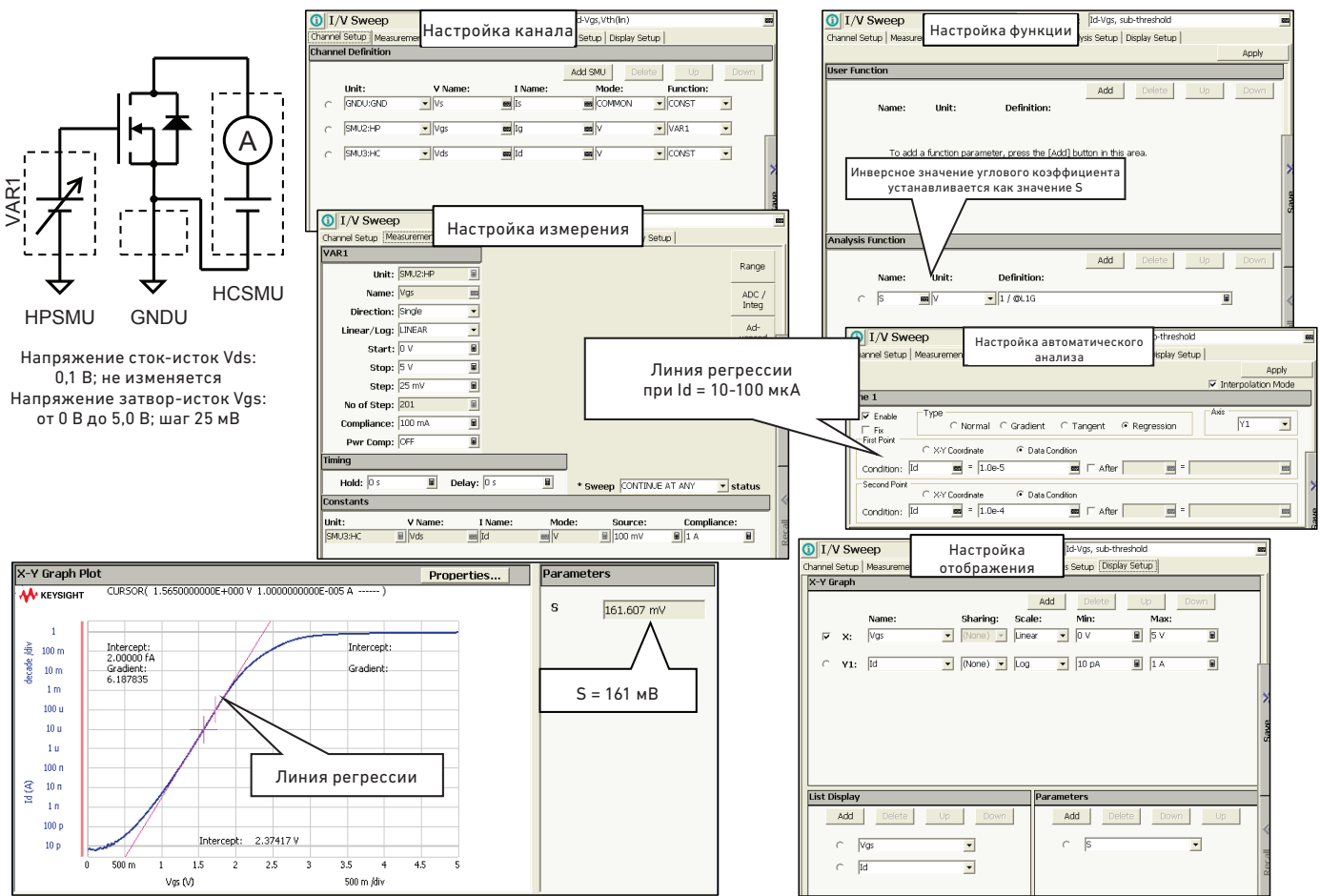


Рис. 8: Определение подпорогового размаха (S) из характеристик Id-Vgs мощного полевого МОП-транзистора

Напряжение пробоя сток-исток (BVdss) и ток отсечки стока (Idss)

Величину напряжения пробоя сток-исток (BVdss) и тока отсечки стока (Idss) можно получить из результатов измерения тока утечки стока. При замкнутых на землю затворе и истоке напряжение стока свипируют от нуля до очень больших значений при помощи модуля HVSMU. Затем измеряется результирующий ток стока и строится график в полулогарифмических координатах. Для определения значений BVdss и Idss можно воспользоваться функцией маркера.

При помощи параметров режима маркера, находящихся на странице настройки автоматического анализа, он автоматически переместится в заданное положение сразу по завершении измерений. Кроме того, если воспользоваться функциями считывания, которые конфигурируются при помощи страниц настройки функции и отображения, то для конечного графика можно задать отображение параметра BVdss или Idss.

Для получения величины напряжения пробоя сток-исток (BVdss) и тока отсечки стока (Idss) на основании измерений свипированием может использоваться прикладной тест, показанный на рис. 9. В данном случае измерение Id-Vds выполняется с использованием обычного режима тестирования, а затем маркер перемещается в положение, при котором Id = 1 мкА (то есть представляет собой значение Id, выбранное для определения напряжения пробоя). Далее величина Vds, соответствующая положению маркера, устанавливается как значение переменной BVdss. Выполняется дополнительный автоматический анализ, при котором маркер перемещается в положение, при котором Vds = 1500 В, то есть имеет значение, выбранное для определения величины тока отсечки. Величина Id, соответствующая положению маркера, устанавливается как значение переменной Idss. Извлеченные параметры затем отображаются в окне результирующего графика.

Традиционные аналоговые характериографы не обеспечивают измерение малых токов (менее 1 мкА) с достаточной точностью, в силу чего их применение возможно только при измерениях напряжения пробоя. В отличие от них, анализатор B1505A способен измерять малые токи субпикоамперного уровня, что позволяет использовать его для измерения как напряжений пробоя, так и токов утечки.

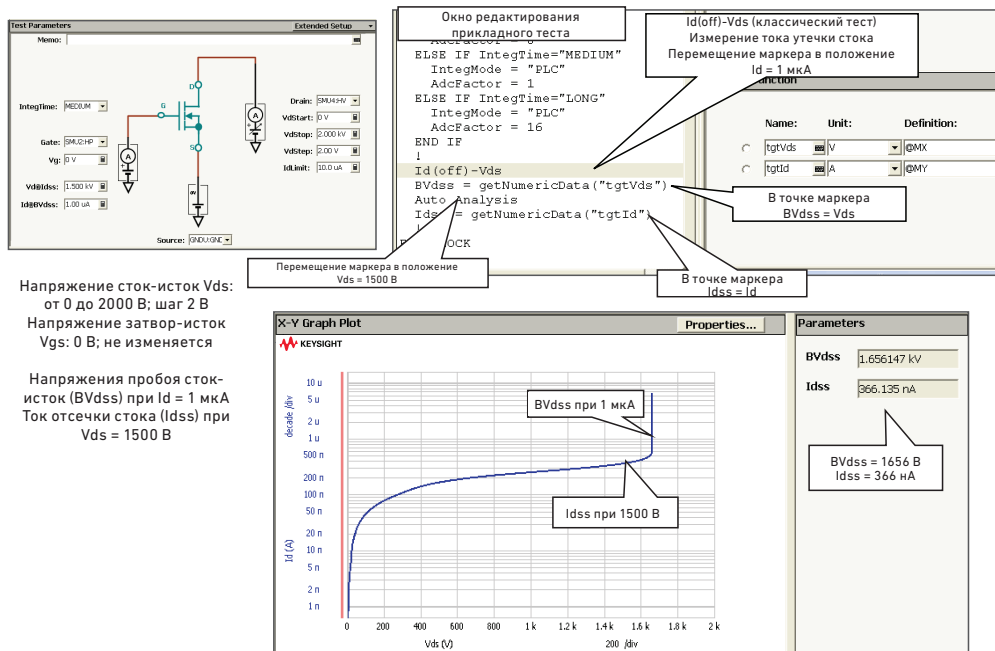


Рис. 9: Прикладные тесты позволяют в автоматическом режиме определять напряжение пробоя сток-исток (BVdss) и ток отсечки стока (Idss) мощного полевого МОП-транзистора

Характеристики паразитных емкостей Cds, Cgd и Cgs

Паразитные емкости (Cds, Cgd и Cgs) мощного полевого МОП-транзистора зависят от приложенного напряжения стока, а их величина влияет на характеристики переключения МОП-транзистора. По этой причине паразитные емкости мощного полевого МОП-транзистора – важные параметры. Обычно в перечне технических данных мощного полевого МОП-транзистора указываются величины входной емкости Ciss, выходной Coss и емкости обратной связи Crss. Эти параметры рассчитываются с использованием значений паразитных емкостей. Высоковольтное смещение по Т-образной схеме, применяемое в анализаторе B1505A, облегчает выполнение таких измерений, поскольку для этого можно одновременно использовать модули многочастотного измерителя емкости (MFCMU) и высоковольтного источника/измерителя (HVSMU), обеспечивающие измерение емкости при постоянном напряжении смещения величиной до 3000 В.

Емкость сток-источник (Cds) измеряется методом, показанным на рис. 10. Клеммы CMH (высокопотенциальные выводы измерителя емкости) и CML (низкопотенциальные выводы измерителя емкости) тройника высоковольтного смещения подключаются к клеммам стока и источника соответственно. Клемма guard-экрана переменного тока подключается к выводу затвора, обеспечивая создание такого же потенциала, как и на клемме источника. Напряжение смещения стока свипируется от 0 В до требуемого постоянного напряжения смещения, при этом выполняется построение характеристики Cds-Vds. Следует заметить, что когда guard-экран подключен к выводу затвора, емкости Cgs и Cgd не влияют на измерение емкости Cds.

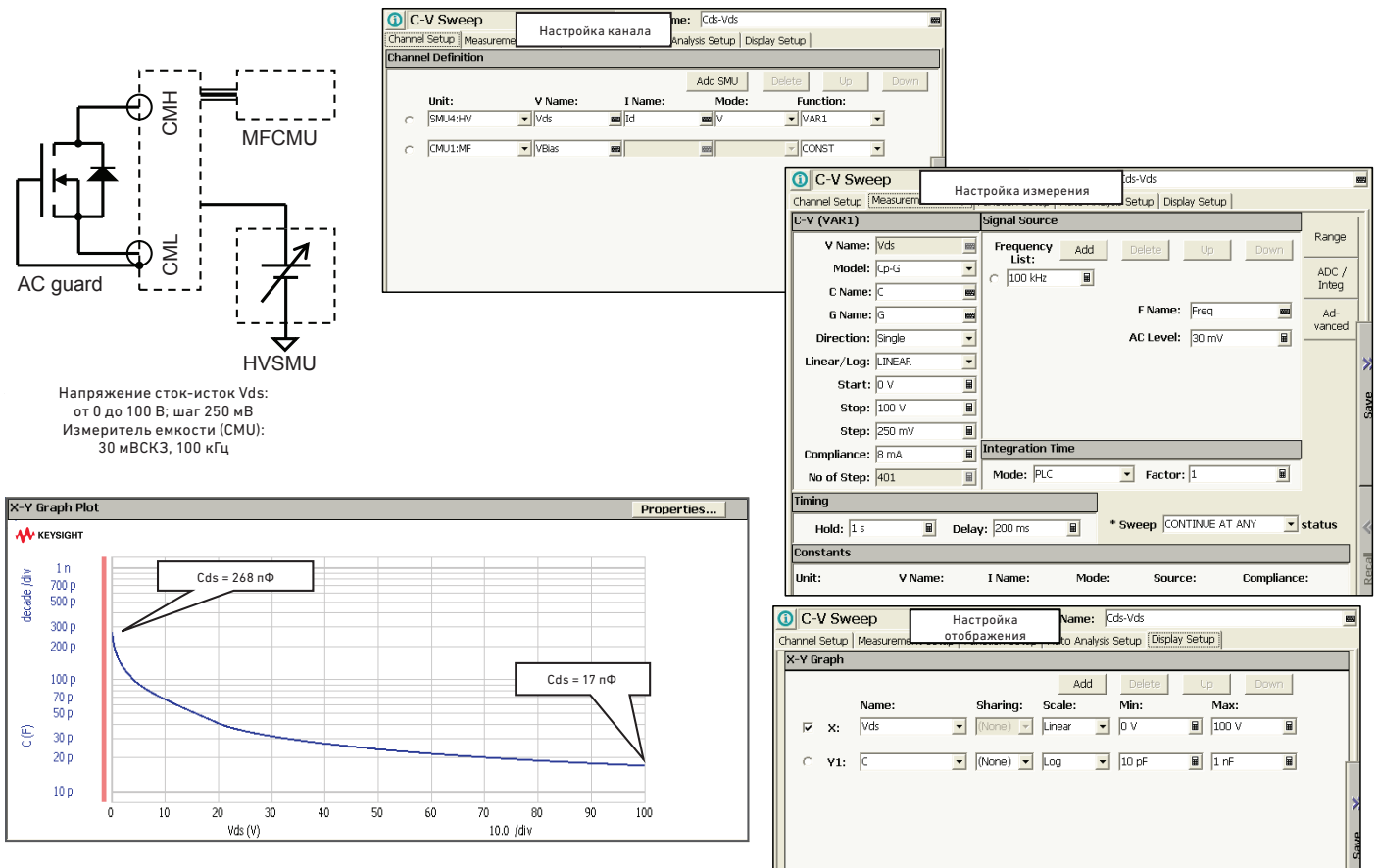


Рис. 10: Измерение характеристики Cds-Vds при Vgs = 0 В

Емкость затвор-сток (C_{gd}) измеряется методом, показанным на рис. 11. Клеммы CMH (высокопотенциальные выводы измерителя емкости) и CML (низкопотенциальные выводы измерителя емкости) тройника высоковольтного смещения подключаются к клеммам стока и затвора соответственно. Клемма guard-экрана переменного тока подключается к выводу истока, обеспечивая создание такого же потенциала, как и на клемме затвора. Напряжение смещения стока свипируется от 0 В до требуемого постоянного напряжения смещения, при этом выполняется построение характеристики $C_{gs} - V_{ds}$. Следует заметить, что когда guard-экран подключен к выводу затвора, емкости C_{gs} и C_{ds} не влияют на измерение емкости C_{gd} .

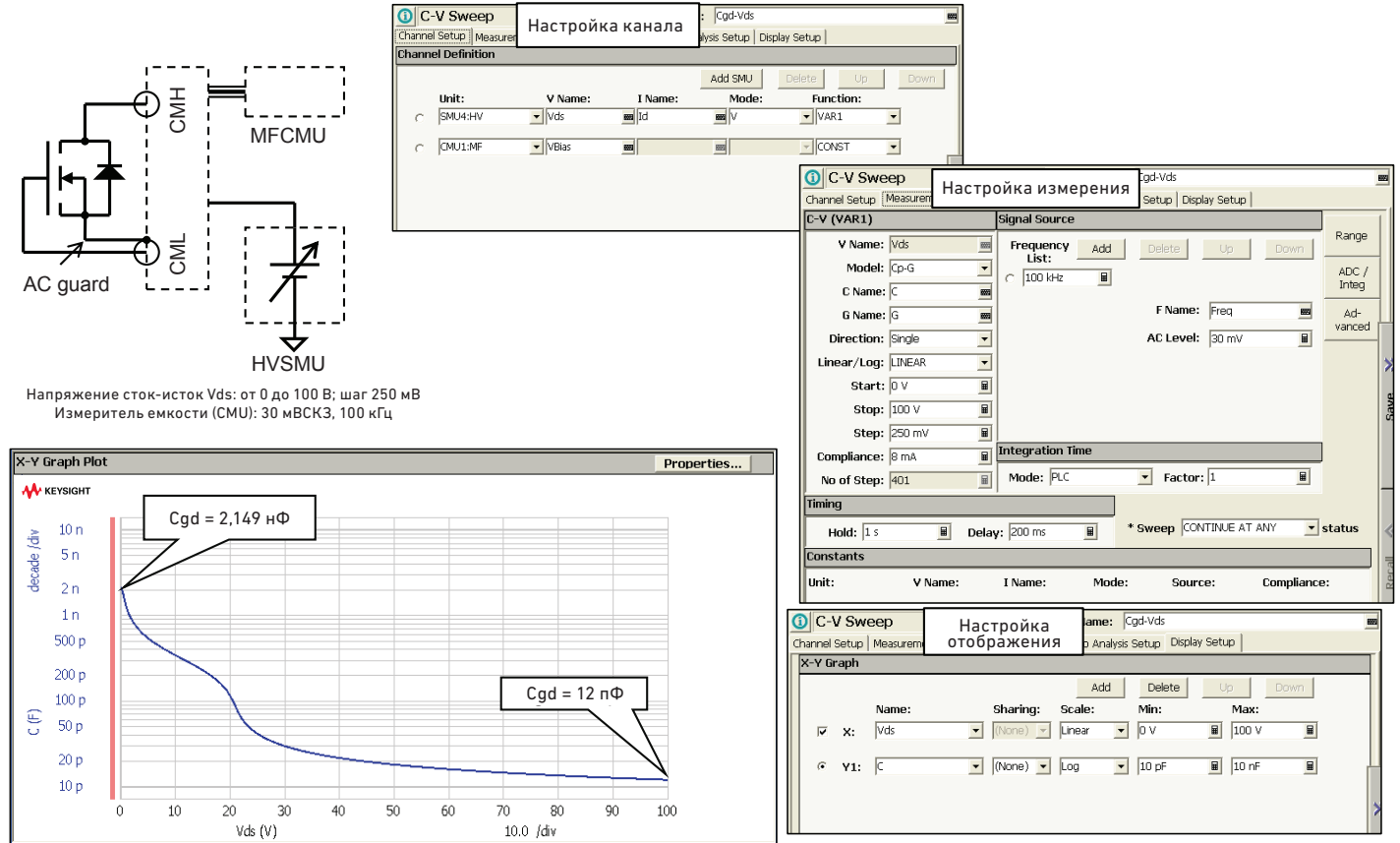


Рис. 11: Измерение характеристик $C_{gd} - V_{ds}$ при $V_{gs} = 0$ В

Емкость затвор-исток (C_{gs}) измеряется методом, показанным на рис. 12. В этом случае вывод стока следует подключить к guard-экрану переменного тока, а модуль высоковольтного источника/измерителя (HVSMU) не имеет непосредственного подключения к трюнику высоковольтного смещения. Для обеспечения низкого импеданса переменного тока на выводе стока вывод стока подключаются к модулю HVSMU через резистор 100 кОм, тогда как guard-экран переменного тока подключается через обходной конденсатор большой емкости. В примере, показанном на рис. 12, для достижения погрешности на уровне 1% необходимая емкость составляет минимум 500 нФ. Следует заметить, что номинальное напряжение конденсатора должно быть больше, чем максимальное напряжение стока, используемое при измерении емкости C_{gs} .

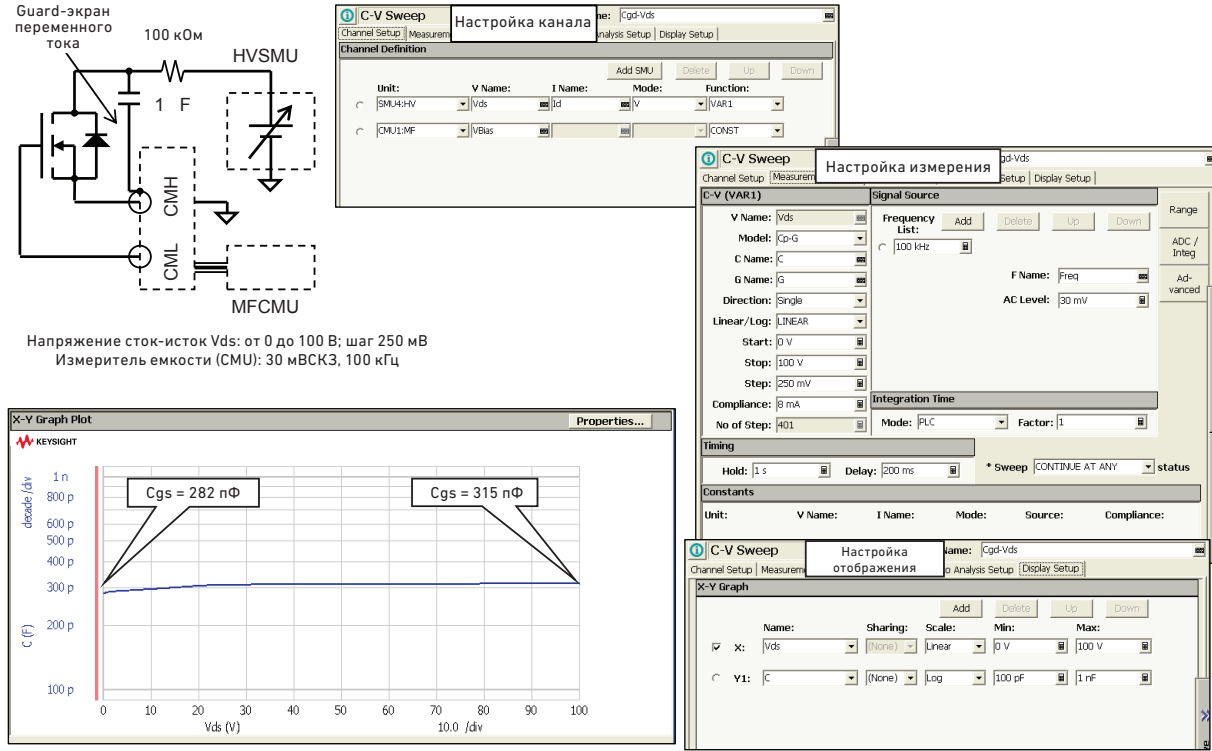


Рис. 12: Измерение характеристик C_{gs} - V_{ds} при $V_{gs} = 0$ В

В перечнях технических данных мощных полевых МОП-транзисторов после электрических характеристик приводятся параметры емкости. Типовыми указанными параметрами являются выходная емкость (C_{oss}), входная емкость (C_{iss}) и емкость обратной связи (C_{rss}); все они могут рассчитываться на основании данных о емкостях C_{ds} , C_{gs} и C_{gd} при помощи уравнений, приведенных на рис. 13. В некоторых технических описаниях в качестве справочных данных также приводятся графики зависимости C_{oss} , C_{iss} и C_{rss} от напряжения V_{ds} . Как показано на рис. 12, емкость C_{gs} слабо зависит от напряжения стока (V_{ds}), поэтому параметр C_{gs} при $V_{ds} = 0$ В может использоваться для оценки параметра емкости обратной связи.

Параметры емкости мощных полевых МОП-транзисторов:

Выходная емкость (C_{oss})

$$= C_{gd} + C_{ds}$$

Входная емкость (C_{iss})

$$= C_{gs} + C_{gd}$$

Емкость обратной связи (C_{rss})

$$= C_{gd}$$

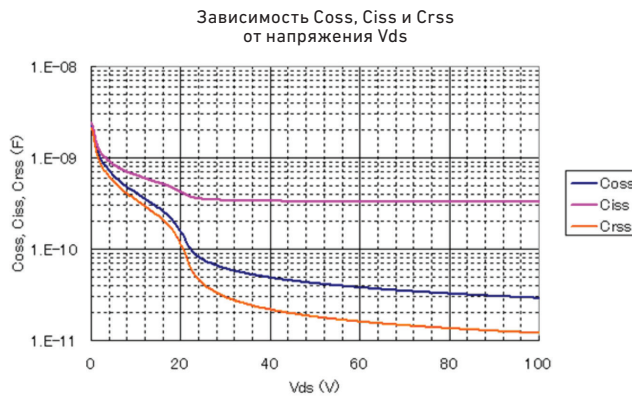


Рис. 13: Параметры емкости мощных полевых МОП-транзисторов C_{oss} , C_{iss} и C_{rss}

Определение характеристик плоскостных биполярных транзисторов (BJT) большой мощности

В последующих разделах рассмотрены задачи по определению характеристик плоскостных биполярных транзисторов (BJT) большой мощности

Статические характеристики I_c - V_{ce} и напряжение Эрли

Зависимость I_c - V_{ce} – наиболее важная характеристика силовых биполярных транзисторов. При ее построении в конфигурации с общим эмиттером ток базы (I_b) подается на вывод базы, тогда как напряжение коллектора (V_{ce}) свипируется от нуля до заданной величины напряжения. Измеряется ток коллектора (I_c), и на основании полученных данных строится график I_c - V_{ce} . Обычно ток базы (I_b) изменяется несколько раз, и этот процесс повторяется с целью создания семейства кривых. В силовых биполярных транзисторах он может стать причиной значительного нагрева прибора из-за большого рассеяния мощности. Модуль источника/измерителя большой силы тока (HCSMU) в анализаторе B1505A способен выдавать на выход импульсы тока шириной до 50 мкм, что позволяет осуществлять точные измерения ВАХ, при этом устранив эффект саморазогревания прибора. На рис. 14 показан пример измерения характеристики I_c - V_{ce} при помощи импульсного режима.

Напряжение Эрли (Vearly), которое представляет собой параметр модели SPICE биполярного транзистора, может быть определено из характеристики I_c - V_{ce} при помощи функций графического анализа программы EasyEXPERT. Программа EasyEXPERT позволяет указать точку на графике I_c - V_{ce} и построить касательную, как показано на рис. 14. На дисплей будут выведены координаты X и Y пересечения касательной с осями, а также значение углового коэффициента касательной. Точка пересечения с осью X соответствует величине напряжения Эрли.

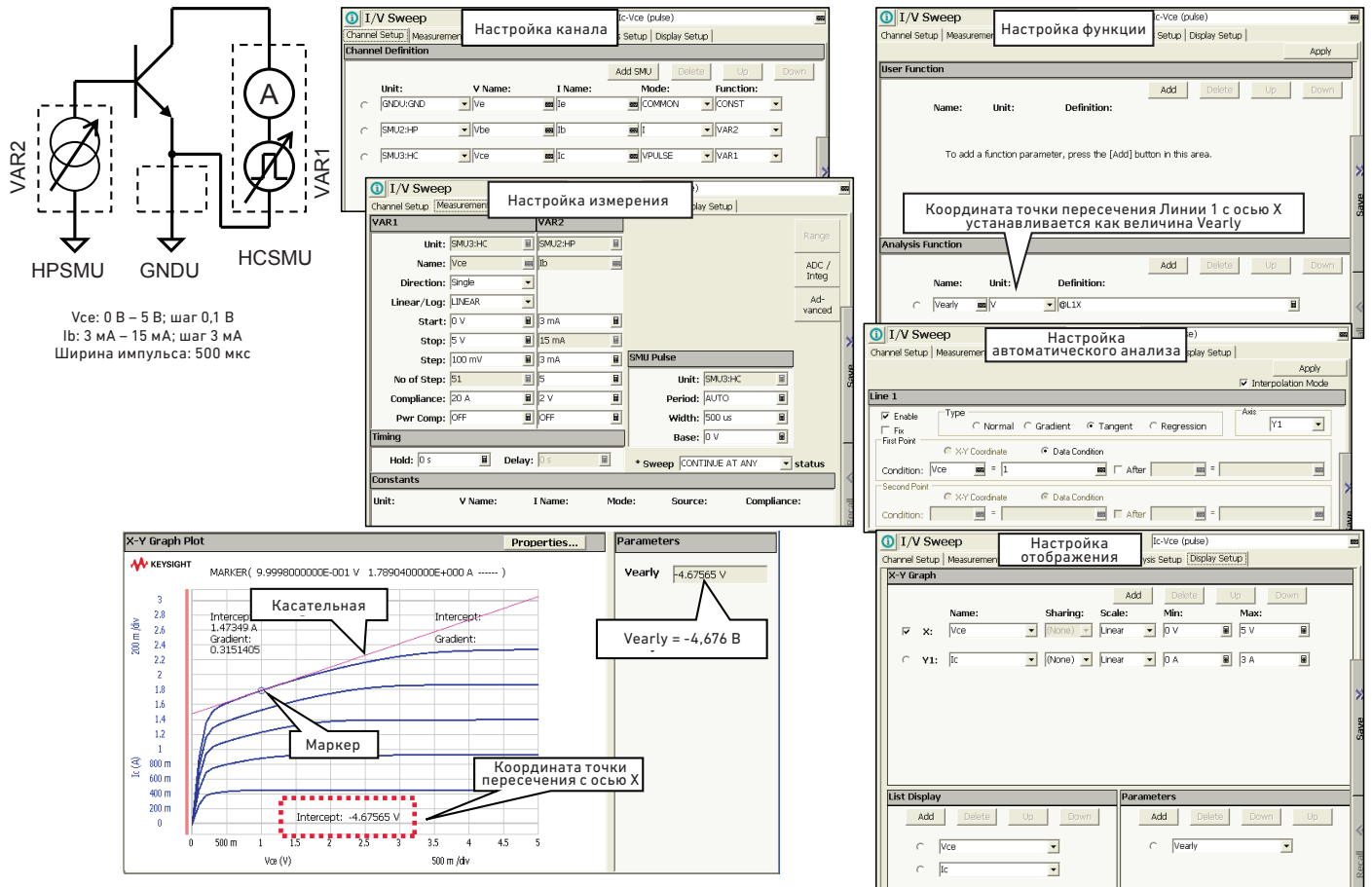


Рис.14: Определение напряжения Vearly для силового биполярного транзистора на основании характеристик I_c - V_{ce} при помощи функций автоматического анализа программы EasyEXPERT

Кривая Гуммеля и коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером (бета)

Построение кривой Гуммеля, которая представляет собой коэффициент усиления по току биполярного транзистора (бета), является одним из наиболее важных измерений, выполняемых для биполярных транзисторов. Для этого требуются измерительные приборы, способные точно измерять малые токи, поскольку ток базы (I_b) обычно более чем в сто раз меньше тока коллектора (I_c). Для построения кривой Гуммеля измеряется ток базы, и ток коллектора (I_b и I_c) при свипировании напряжения база-эмиттер (V_{be}). При этом напряжение база-коллектор сохраняет постоянную величину (обычно 0 В), а зависимость I_b и I_c от V_{be} строится в полулогарифмическом масштабе. На рис. 15 показан пример типового измерения при построении кривой Гуммеля для биполярного

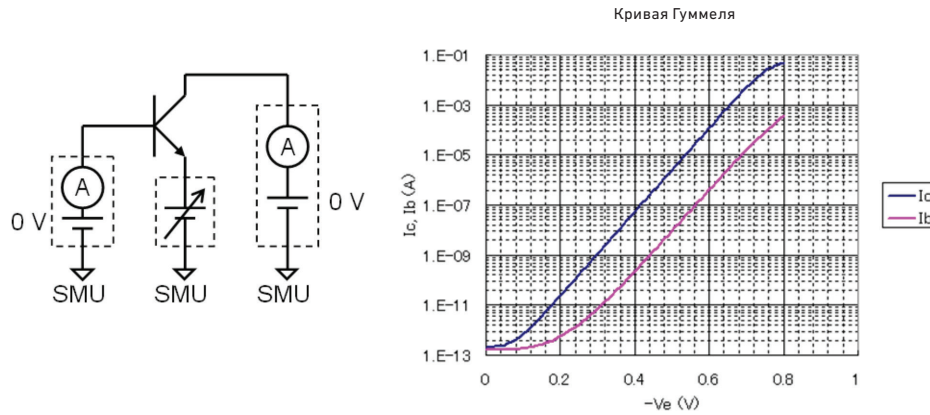


Рис. 15: Типовой метод измерения и результат при построении кривой Гуммеля для биполярного транзистора

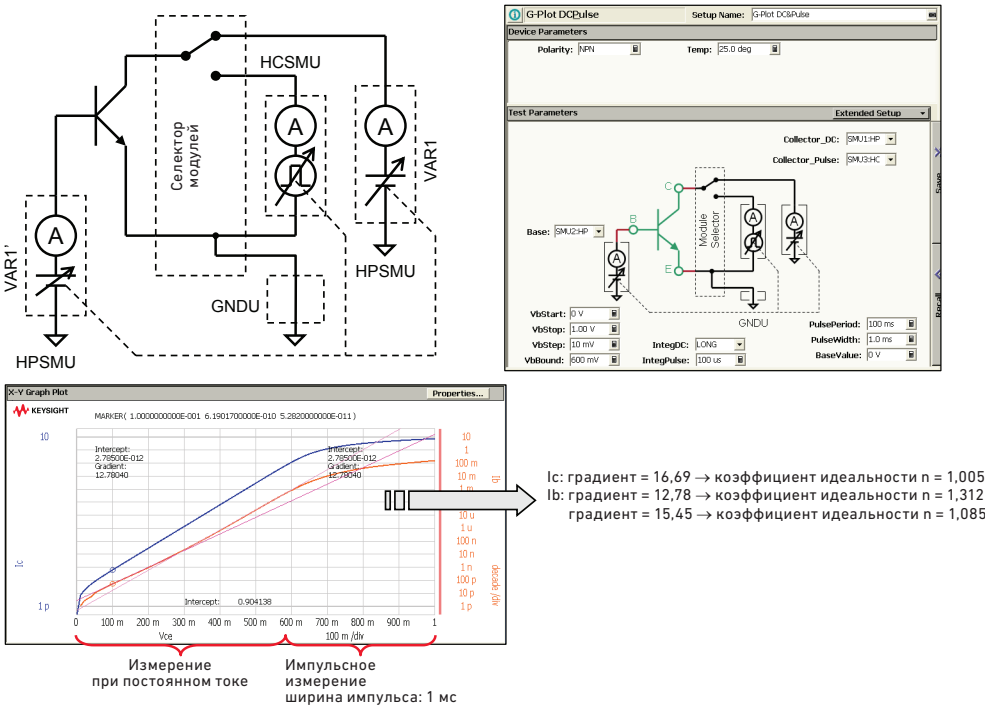


Рис. 16: Кривая Гуммеля силового биполярного транзистора, построенная при помощи методов постоянного и импульсного измерения; соответствующая измерительная схема

Анализатор V1505A позволяет выполнять точные измерения кривой Гуммеля для силовых биполярных транзисторов, используя методы постоянного и импульсного измерения. Хотя напряжение база-эмиттер величиной в 1 В кажется небольшим, рассеивание мощности через переход база-коллектор может превысить 1 Вт, когда ток коллектора превышает 1 А. Чтобы предотвратить искажение результата измерений, вызванное эффектом саморазогревания, для ограничения повышения температуры в зоне перехода используется импульсный режим измерения с управляемым циклом.

На рис. 16 показаны пример кривой Гуммеля силового биполярного транзистора, измерительная схема и данные выполненных замеров. Для измерения малых токов пикоамперного уровня используются два модуля источника/измерителя высокой мощности (HPSMU), в то время как для измерения больших токов (более 1 А) в импульсном режиме – модули источника/измерителя высокой мощности (HPSMU) и источника/измерителя большой силы тока (HCSMU). Для переключения между модулями HPSMU и HCSMU используется блок селектора. Приложение для тестирования, которое объединяет в себе два типа измерений (при постоянном токе и в импульсном режиме), обеспечивает отображение результатов измерений на графике. Функции графического анализа позволяют извлечь параметры устройства, такие, например, как коэффициент идеальности n . При малой и средней величине напряжения V_{ce} ток коллектора (I_c) будет иметь линейный вид, а его коэффициент идеальности составит $n=1,005$ (градиент = 16,69 при $V_{ce} = 0,3$ В); однако для тока базы I_b коэффициент идеальности будет составлять $n=1,085$ при напряжении $V_{ce} = 0,55$ В, а при напряжении V_{be} между 0 В и 0,3 В – $n=1,312$.

Кривая Гуммеля также используется для получения еще одного важного параметра биполярных транзисторов, который называется коэффициентом усиления по току в схеме с общим эмиттером (β) и рассчитывается как отношение токов коллектора и базы (I_c/I_b). Кривая Гуммеля часто применяется для определения диапазона токов коллектора при максимальном значении β , поскольку этот параметр весьма важен при проектировании цепи биполярного транзистора. На рис. 17 показан пример данных, полученных на основании кривой Гуммеля, из которой видно, что коэффициент усиления по току имеет максимальные значения на участке, в котором величина тока коллектора составляет приблизительно 400 мА.

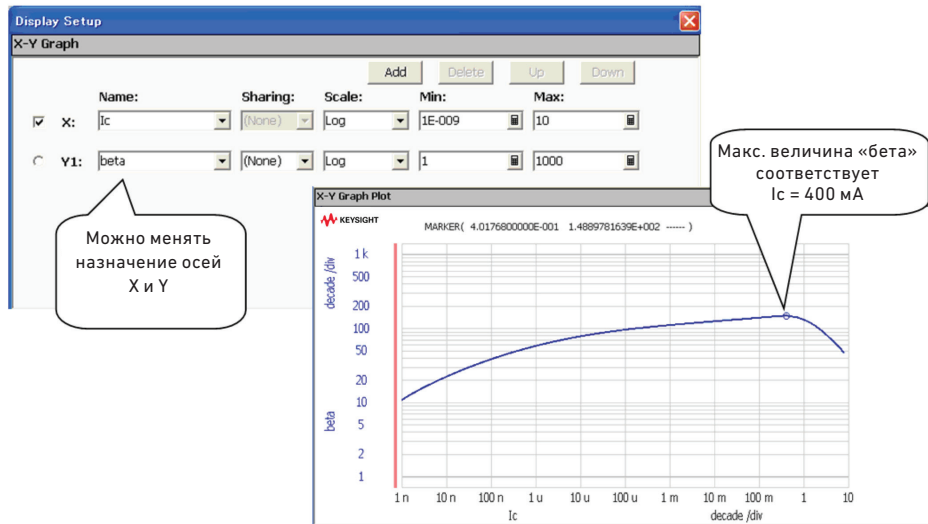


Рис. 17: Коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером (β), полученный из кривой Гуммеля силового биполярного транзистора

Определение сопротивления эмиттера R_e методом обратного хода

Метод обратного хода чаще всего используется для определения сопротивления эмиттера R_e биполярного транзистора. Согласно этому методу, модуль источника/измерителя в режиме силы тока подключается к выводу коллектора, при этом модуль настроен на очень малый выходной ток (около нуля ампер), поэтому действует главным образом как вольтметр с высоким входным импедансом. Модуль источника/измерителя, подключенный к выводу базы, создает относительно большой ток (более 10 мА).

Измеряется напряжение коллектор-эмиттер (V_{ce}) и строится график его зависимости от тока базы (I_b), как показано на рис. 18. Как видно на рисунке, когда величина тока базы находится в пределах от 40 до 100 мА, график имеет вид почти прямой линии, угловой коэффициент которой равен величине, обратной сопротивлению эмиттера (R_e). Таким образом, для расчета углового коэффициента линии можно выполнить регрессионный анализ графика, а величина, обратная результату, будет представлять собой сопротивление эмиттера (R_e).

После определения участка линии регрессии на странице настройки автоматического анализа можно задать условия его выполнения, а на странице настройки функций – уравнение для расчета сопротивления R_e , как показано на рис. 18. Выполнение всех этих действий позволит определять сопротивление эмиттера (R_e) в автоматическом режиме.

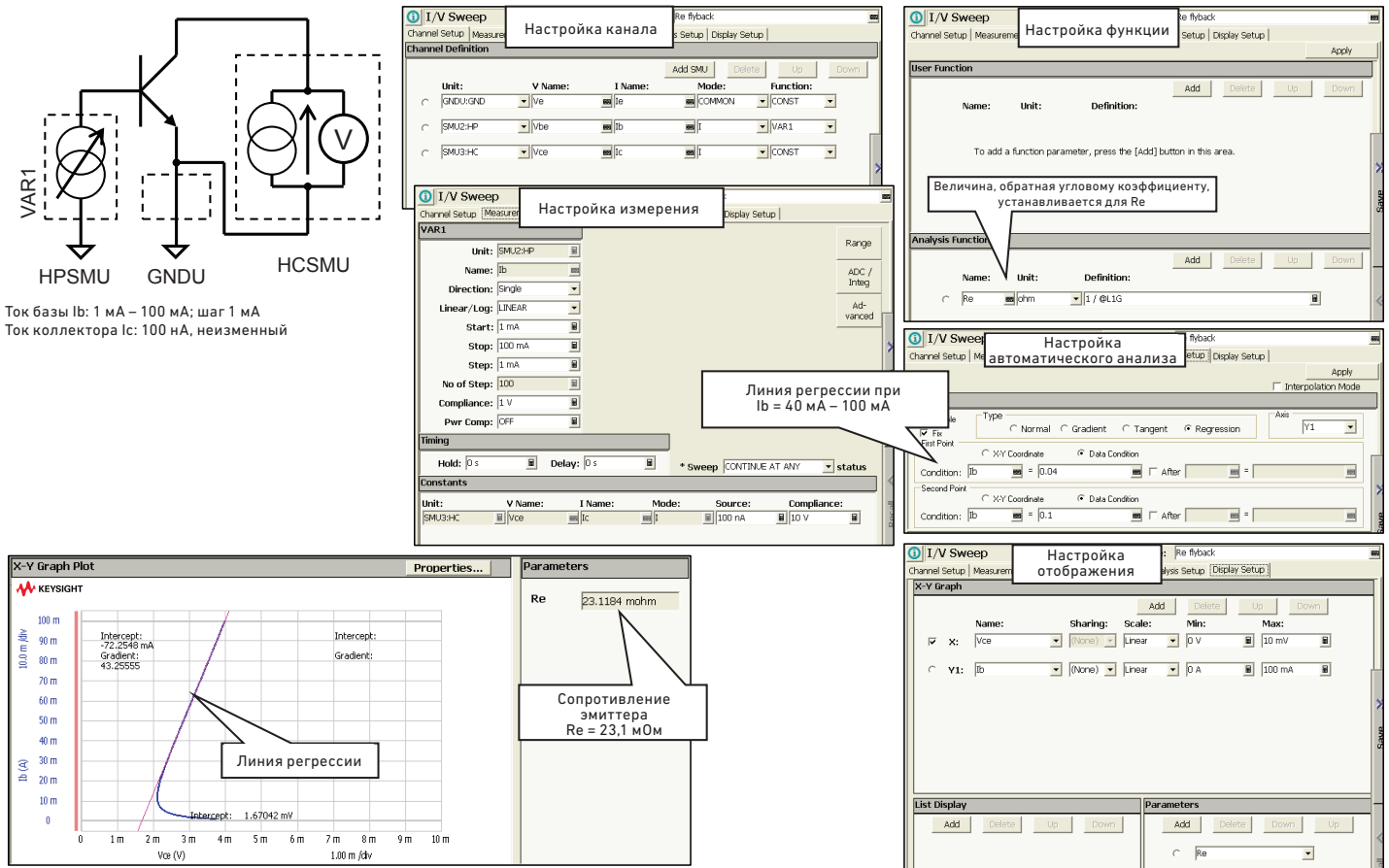


Рис. 18: Определение сопротивления эмиттера R_e методом обратного хода

Определение сопротивления коллектора в области насыщения

Сопротивление коллектора R_c и сопротивление эмиттера R_e в области насыщения описываются следующими уравнениями:

$$V_{ce} = I_c \times R_c + (I_b + I_c) \times R_e$$

$$R_{out} = V_{ce}/I_c$$

$$= R_c + (1 + I_b/I_c) \times R_e$$

Как видно из приведенных выше уравнений, выходное сопротивление R_{out} представляет собой величину, обратную угловому коэффициенту выходной характеристики биполярного транзистора в области насыщения. Ток базы (I_b) и ток коллектора (I_c) подаются при постоянном соотношении с использованием функций основного свипирования (VAR1) и синхронного основного свипирования (VAR1'). Затем измеряется напряжение на коллекторе для построения графика зависимости I_c - V_{ce} . На рис. 19 приведен пример зависимости I_c от V_{ce} , когда ток коллектора $I_c = 10 \times I_b$. В области от 400 мА до 1 А ток коллектора I_c является почти линейным, и угловой коэффициент линии регрессии в данной области будет равен величине, обратной выходному сопротивлению (R_{out}). При условии, что $I_c = 10 \times I_b$, можно упростить приведенное выше уравнение следующим образом:

$$R_{out} = R_c + 1,1 \times R_e$$

$$R_c = R_{out} - 1,1 \times R_e$$

Сопротивление эмиттера (R_e) определяется методом обратного хода, который описан в предыдущем разделе. Вы можете задать условия для линии регрессии и функций анализа, воспользовавшись страницами настройки автоматического анализа и настройки функций, как показано на рис. 19, что позволит рассчитывать сопротивление коллектора (R_c) в автоматическом режиме.

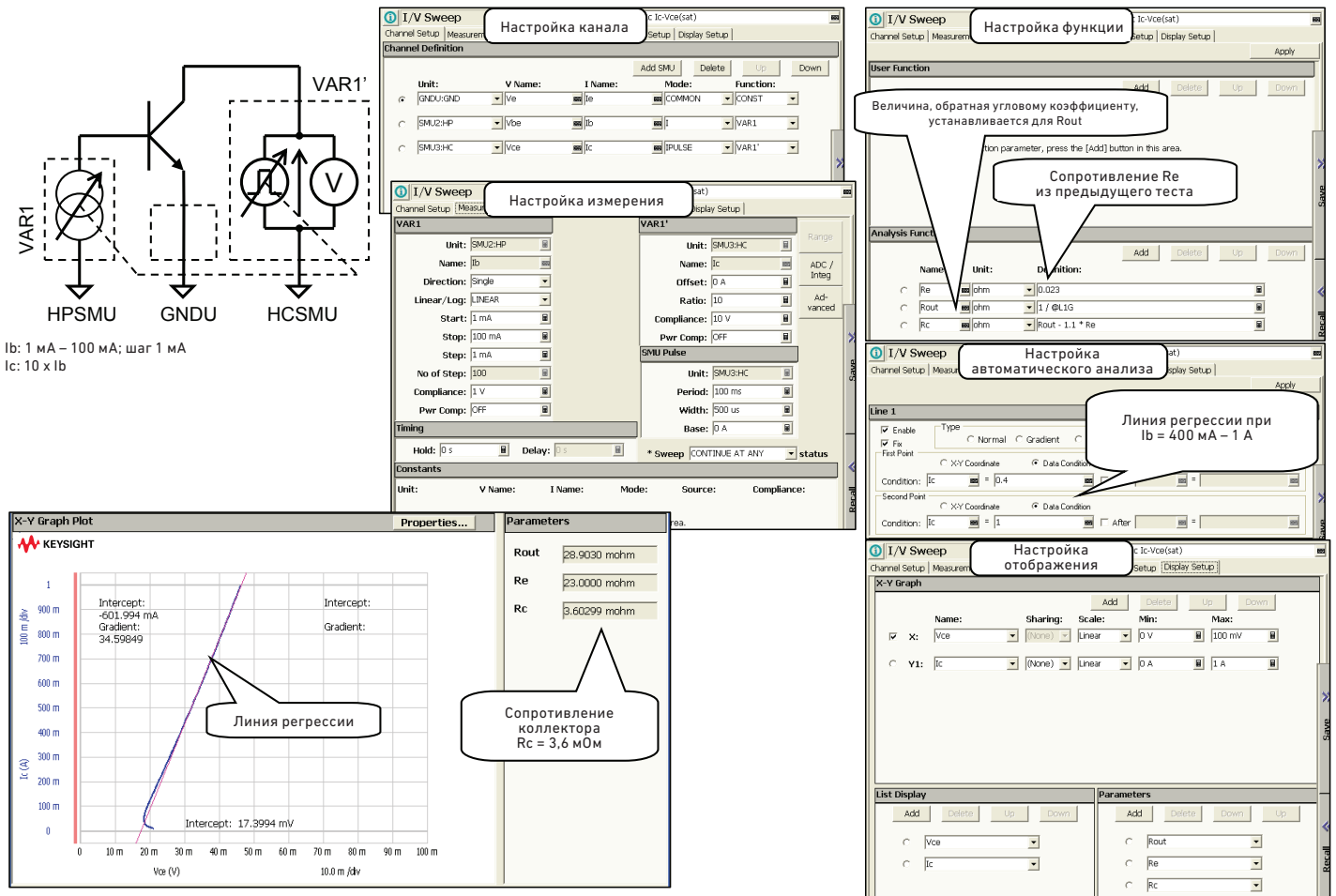


Рис. 19: Определение сопротивления коллектора R_c из характеристик I_c - V_{ce} в области насыщения

Напряжение пробоя V_{Cbo} , V_{Ceo} и V_{Ebo} и ток утечки

При обозначении напряжения пробоя первые две буквы нижнего индекса, следующие за обозначением «BV», обозначают два вывода, к которым приложено данное напряжение. Третья буква индекса – состояние другого вывода устройства (предполагается, что полупроводниковое устройство имеет три вывода). То есть, индекс «o» значит «разомкнут», а индекс «s» – «замкнут накоротко» (то есть, замкнут со вторым выводом). Следовательно, напряжения пробоя перехода мощных плоскостных биполярных транзисторов (BJT) будут обозначаться следующим образом:

V_{Cbo} – напряжение пробоя коллектор-база при разомкнутой цепи эмиттера
 V_{Ceo} – напряжение пробоя коллектор-эмиттер при разомкнутой цепи базы
 V_{Ebo} – напряжение пробоя эмиттер-база при разомкнутой цепи коллектора

Поскольку анализатор B1505A охватывает широкий диапазон напряжений, поэтому вы сможете измерить напряжение пробоя большинства силовых биполярных транзисторов.

На рис. 20 приведено несколько примеров результатов измерений напряжения пробоя. Графики представляют не только величину напряжений пробоя, но и величину устойчивого тока утечки с разрешением по току на уровне пикоампер. Концентрация легирования в области коллектора – самая низкая, по сравнению с другими областями, поэтому максимальное напряжение пробоя относится к величине V_{Cbo} . И наоборот, степень легирования в области эмиттера – максимальная, по сравнению с другими областями, поэтому параметр V_{Ebo} имеет минимальное значение. Графические функции анализатора B1505A позволят вам легко совместить все эти графики в одной координатной плоскости, а также внести комментарии для их использования в отчетах и презентациях.

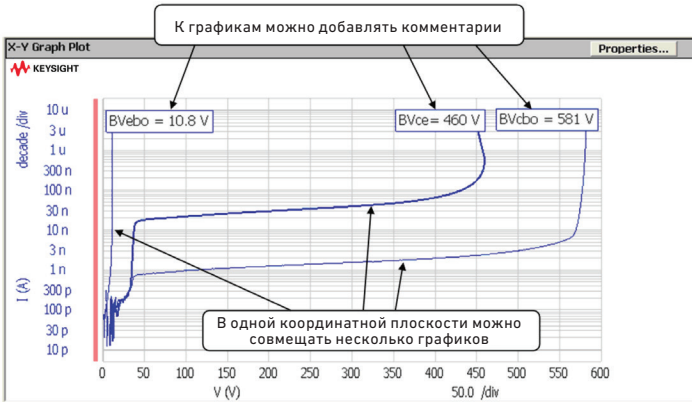


Рис. 20: Измерение напряжения пробоя и тока утечки в мощных плоскостных биполярных транзисторах

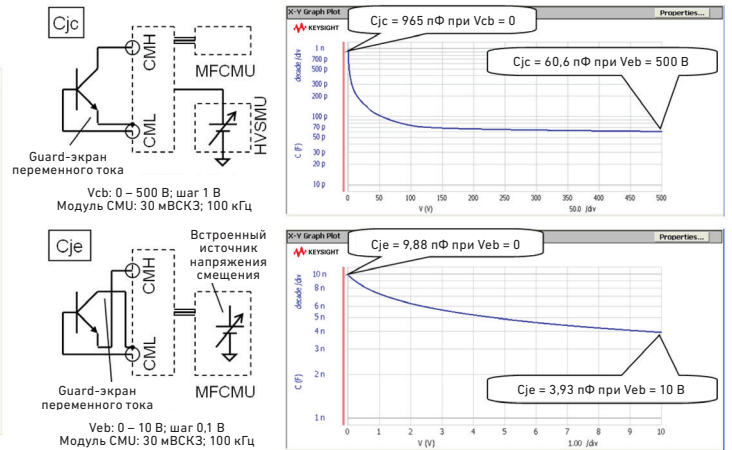


Рис. 21: Характеристики емкости перехода C_{jc} и C_{je} мощного плоскостного биполярного транзистора

Емкость перехода: характеристики C_{jc} и C_{je}

Биполярный транзистор имеет два p-n перехода: один – между эмиттером и базой (C_{je}), а второй – между коллектором и базой (C_{jc}). Для низковольтного постоянного тока смещения (< 20 В) можно использовать источник смещения, встроенный с модуль MFCMU. Если требуется более высокое постоянное напряжение смещения (до 3000 В), вы можете воспользоваться модулями MFCMU, HVSMU и высоковольтным тройником смещения. На рис. 21 приведено несколько примеров результатов измерений емкости переходов. Напряжение смещения при измерении емкости перехода эмиттер-база достаточно низкое, чтобы его можно было измерить при помощи только модуля MFCMU. Постоянное напряжение смещения для измерения емкости перехода коллектор-база требует использования, помимо MFCMU, модуля HVSMU и высоковольтного тройника смещения.

Оценка свойств новых полупроводниковых материалов

Новые широкозонные полупроводниковые материалы (WBG), такие как карбид кремния (SiC) и нитрид галлия (GaN), имеют значительный потенциал в области разработки полупроводниковых устройств большой мощности из-за своей способности выдерживать высокие напряжения и скорости переключения. Хотя свойства материалов таких типов могут анализироваться с использованием электрических, оптических или физических методов определения характеристик, предпочтительны электрические методы исследования, поскольку они наиболее просты в использовании. В последующих разделах рассмотрены методы определения электрических характеристик полупроводниковых материалов, созданных на основе алмазных структур и карбида кремния (SiC).

Обратная вольт-амперная характеристика диода с барьером Шоттки

Алмаз, который имеет широкое распространение как исходный материал для ювелирной промышленности, состоит из углерода (условное обозначение – «C») и известен, как самый твердый материал в мире. Однако, поскольку углерод занимает IV колонку в периодической таблице, в которой также находятся кремний (Si) и германий (Ge), он обладает и свойствами полупроводника. Недавние исследования показали, что алмаз имеет запрещенную зону шириной 5,5 эВ, что значительно превосходит ширину зон для Si и GaAs, которые составляют 1,11 эВ и 1,43 эВ соответственно. Это свойство позволяет использовать алмазную структуру для изготовления силовых и высокотемпературных полупроводниковых устройств, а его исключительные характеристики устойчивости к пробое иллюстрируют лишь некоторые преимущества широкозонных материалов.

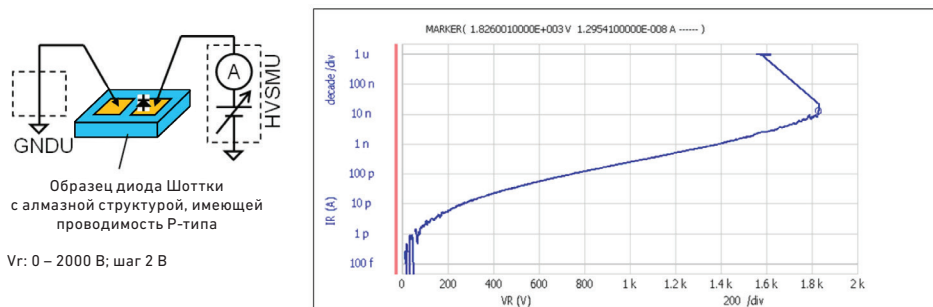


Рис. 22: Характеристики напряжения пробоя и тока утечки диода Шоттки с алмазной структурой

Диод Шоттки (SBD) с алмазной структурой состоит из четырех частей: алмазной подложки, эпитаксиального слоя р-типа, электрода для создания контакта Шоттки (металл-полупроводник), а также электрода для создания омического контакта. На рис. 22 показан пример измерения характеристик диода Шоттки, когда два электрода тестируемого образца подключены к выводам модулей HVSMU и GNDU. К диоду подведено напряжение обратного смещения, которое свипируется в пределах от 0 до 2000 В. При этом с помощью модуля HVSMU измеряется ток утечки, величина которого откладывается в полулогарифмических координатах. Пробой происходит при напряжении 1,826 В и токе утечки в 10 нА. Характеристика также показывает, что при напряжении 1000 В ток утечки составляет 252 пА, что по амплитуде на два порядка меньше, чем аналогичный показатель для эквивалентного кремниевого диода.

Прямая вольт-амперная характеристика 4H-SiC диода с барьером Шоттки

Карбид кремния – хорошо изученный широкозонный полупроводниковый материал, свойства которого делают его идеальным для использования в силовых и высокотемпературных полупроводниковых устройствах. Есть три типа кристаллических структур карбида кремния, которые обозначаются как 3С, 6Н и 4Н и имеют ширину запрещенной зоны 2,20 эВ; 2,86 эВ и 3,02 эВ соответственно. В следующем разделе рассмотрены измерения для прямых вольт-амперных характеристик 4H-SiC диода Шоттки, а также процесс определения типовых параметров устройства.

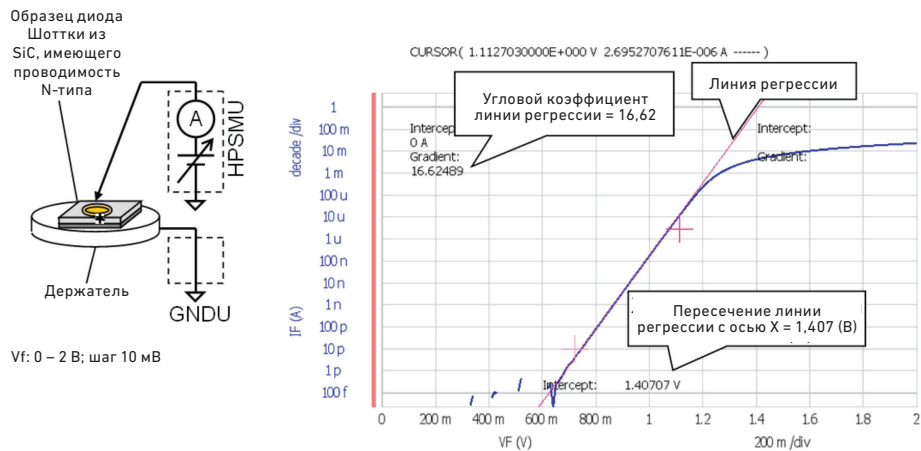


Рис. 23: Прямая вольт-амперная характеристика 4H-SiC диода Шоттки

Использованный в данном примере 4H-SiC диод Шоттки выполнен на коммерческой полупроводниковой пластине из карбида кремния, с эпитаксиальным слоем из карбида кремния и металлическим электродом. Модули GNDU и HPSMU подключены к держателю зонда и позиционеру (соответственно), как показано на рис. 23. Прямое напряжение свипируется в диапазоне от 0 до 2 В, при этом с помощью модуля HPSMU измеряется прямой ток, полученные значения откладываются в полулогарифмических координатах. Когда прямой ток составляет 100 мкА, диод действует в линейной области, что является типичным режимом для таких устройств. Это может использоваться для определения двух важных параметров диода: коэффициента идеальности (n) и высоты барьера перехода (Φ_B).

Вольт-амперные характеристики диода, как правило, моделируются при помощи следующего уравнения:

$$I = I_s \left(e^{\frac{q}{nKT} V_A} - 1 \right) \dots\dots\dots(1)$$

$$I_s = AA * T^2 e^{-\frac{\phi_B}{kT}}$$

- Где:
- IS: ток насыщения
 - n: коэффициент идеальности диода
 - q: заряд электрона (1,60 x 10⁻¹⁹ Кл)
 - k: постоянная Больцмана (8,617 x 10⁻⁵ эВ/К)
 - T: абсолютная температура
 - V_A: приложенное постоянное напряжение
 - A: площадь диода Шоттки
 - A*: модифицированная постоянная Ричардсона (120 x (m*n/m0) А/см²-К²)
 - Φ_B: высота барьера перехода

В средней части характеристика диода – приблизительно линейная, что позволяет при помощи встроенных аналитических функций построить линию регрессии. Поскольку угловой коэффициент этой линии получен для случая десятичного логарифма, для преобразования его к натуральному логарифму потребуется умножить его на ln(10). В данном примере угловой коэффициент для случая с натуральным логарифмом имеет величину 38,27 (т. е. 16,62 x ln(10)). Поскольку этот угловой коэффициент равен q/nkT, коэффициент идеальности можно рассчитать следующим образом:

$$n = \frac{1}{8.617 \times 10^{-5} \times (273 + 25) \times 38.27} = 1.018$$

Как видно, характеристика данного диода Шоттки близка к идеальному случаю (n = 1).

Зная точку пересечения с осью X и угловой коэффициент линии регрессии, вы можете рассчитать точку пересечения с осью Y следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{(Пересечение с осью Y)} &= 10^{-(\text{угл. коэф.}) \times (\text{пересечение с осью X})} \\ &= 10^{-(16.62) \times (1.407)} \\ &= 4,127 \times 10^{-24} \end{aligned}$$

Другими словами, величина тока насыщения (IS) составляет 4,127 x 10⁻²⁴ А. Далее мы можем рассчитать высоту барьера перехода (Φ_B) следующим образом:

$$\begin{aligned} \phi_B &= -kT \ln \left(\frac{I_s}{AA * T^2} \right) \\ &= -8.617 \times 10^{-5} \times (273 + 25) \times \ln \left(\frac{4.127 \times 10^{-24}}{0.05^2 \times \pi \times 34.80 \times (273 + 25)^2} \right) \\ &= 1,64 \text{ (эВ)} \end{aligned}$$

Вольт-фарадные характеристики 4H-SiC диода с барьером Шоттки

Как и во всех полупроводниковых устройствах, емкость перехода в диодах Шоттки зависит от приложенного напряжения, поскольку свипирование напряжения изменяет объемный заряд и обедненные области. Следует заметить, что приложение напряжения должно ограничиваться областью, где переход происходит с обратным смещением. Процедура измерения емкости заключается в свипировании постоянного напряжения смещения, во время которого измеряется емкость. Данные зависимости емкости от напряжения (ВФХ) откладываются на координатной плоскости. Соотношение между емкостью и приложенным напряжением задается следующим уравнением:

$$C = \frac{K_s \epsilon_0 A}{\left[\frac{2K_s \epsilon_0}{qN_D} (V_{bi} - V_A) \right]^{1/2}} \dots\dots\dots(2)$$

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{qN_D K_s \epsilon_0 A^2} (V_{bi} - V_A)$$

Где:

V_{bi} : напряжение поля перехода

K_s : диэлектрическая постоянная полупроводника

ϵ_0 : диэлектрическая проницаемость вакуума ($8,85 \times 10^{-14}$ Ф/см)

N_D : общее количество доноров, атомов/см³

На рис. 24 приведен пример данных измерения ВФХ, выполненного для того же 4H-SiC диода Шоттки, который был рассмотрен в предыдущем подразделе. Поскольку данный диод относится к n-типу, клеммы CMH и CML тройника высоковольтного смещения подключены к зажиму зондовой станции и к наконечнику зонда соответственно. Выполняется свипирование напряжения смещения от 0 до 1 В с шагом 10 мВ, при этом измеряется величина емкости C (в режиме Cr-G), а полученные результаты откладываются на ось Y1 (расположенной слева). Для расчета величины $1/C^2$ на странице настройки функций создается пользовательская функция (CC), и расчетные значения откладываются по оси Y2 (расположенной справа). Как видно на рисунке, величина $1/C^2$ демонстрирует линейную зависимость от приложенного напряжения, и теперь можно рассчитать потенциал поля перехода (V_{bi}), воспользовавшись следующим уравнением:

$$V_{bi} = \left| \left(\text{Пересечение с осью X} \right) + \frac{kT}{q} \right| \dots\dots\dots(3)$$

$$= |-1.481 + 0.026|$$

$$= 1.455(V)$$

где kT/q представляет собой тепловую компенсацию напряжения.

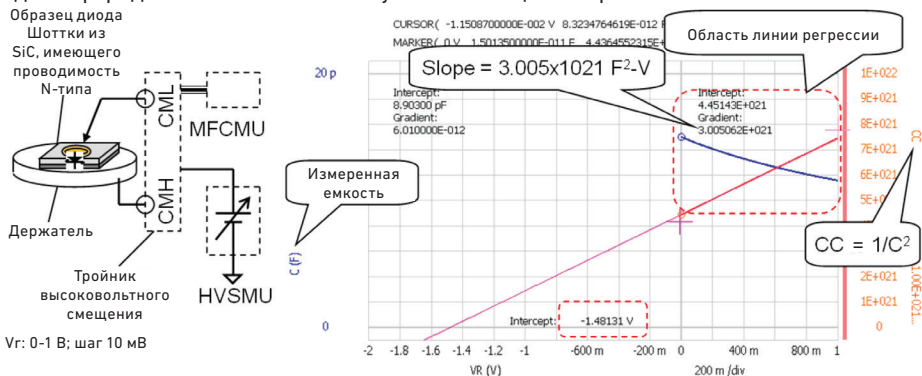


Рис 24: ВФХ 4H-SiC диода Шоттки при низковольтном обратном смещении

Взяв производную предыдущего равенства по $1/C^2$, мы сможем определить концентрацию легирующей примеси (N_D), которая практически равна плотности носителей:

$$N_D = \frac{2}{qK_s \epsilon_0 A^2 \frac{dI/C^2}{dV_A}} \dots\dots\dots(4)$$

$$= \frac{2}{1.60 \times 10^{-19} \times 9.7 \times 8.85 \times 10^{-14} \times 0.05^2 \times \pi \times 3.005 \times 10^{21}}$$

$$= 7.84 \times 10^{13} \text{ (см}^{-3}\text{)}$$

Это позволяет рассчитать величину $(E_c - E_F)_{FB}$, представляющую собой разность между уровнем энергии в зоне проводимости (E_c) и уровнем Ферми (E_F), следующим образом:

$$(E_c - E_F)_{FB} = \frac{E_G}{2} - kT \ln \frac{N_D}{n_i} \dots\dots\dots(5)$$

$$= \frac{3.22}{2} - 8.67 \times 10^{-5} \times (273 + 25) \ln \frac{7.84 \times 10^{13}}{1.11 \times 10^{-8}}$$

$$= 0.318 \text{ (эВ)}$$

Высота барьера перехода (Φ_B) рассчитывается следующим образом:

$$\Phi_B = qV_{bi} + (E_c - E_F)_{FB} \dots\dots\dots(6)$$

$$= 1.455 + 0.318$$

$$= 1.773 \text{ (эВ)}$$

На рис. 25 показаны результаты измерения ВФХ при увеличенном напряжении обратного смещения (300 В). При более низких значениях напряжения характеристика $1/C^2$ является линейно изменяющейся, но приближается к постоянному значению при повышении напряжения (более 200 В). Это означает, что ширина обедненной области прекращает увеличиваться при увеличении обратного смещения.

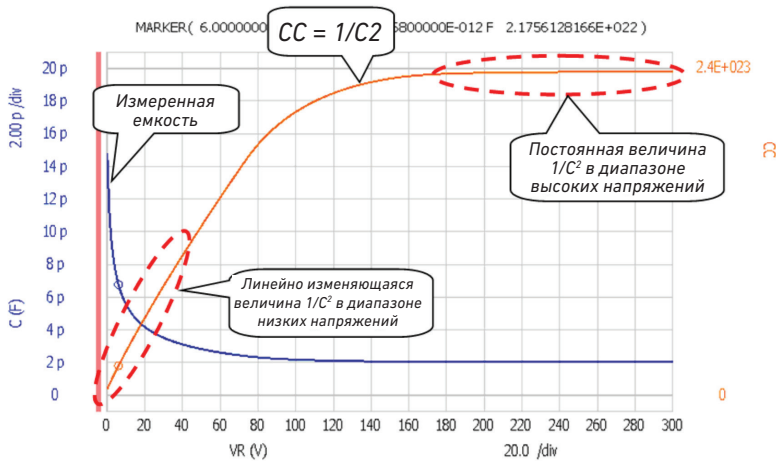


Рис. 25: ВФХ 4H-SiC диода Шоттки при высоком напряжении (300 В) обратного смещения

Уравнение (4) показывает, что концентрация легирующих примесей может быть рассчитана на основании измеренной ВФХ. Когда структура диода с барьером Шоттки действует как конденсатор с параллельными пластинами, ширина обедненного слоя (показывающая глубину x от поверхности перехода Шоттки), рассчитывается следующим образом:

$$x = \frac{K_s \epsilon_0 A}{C} \dots \dots \dots (7)$$

Как показано на рис. 26, уравнения (4) и (7) могут определяться как пользовательские функции для автоматического получения профиля легирования (зависимость концентрации легирующей присадки от положения). На рис. 27 приведен пример профиля легирования для диода Шоттки из SiC, полученный на основе измерений ВФХ. Этот результат показывает, что плотность примесей приблизительно однородна при величине в 10^{14} см^{-3} и что глубина эпитаксиального слоя составляет около 33 мкм. Из результатов также видно, что когда обедненная область достигает подложки, плотность содержания легирующих примесей увеличивается на 10^{17} см^{-3} .

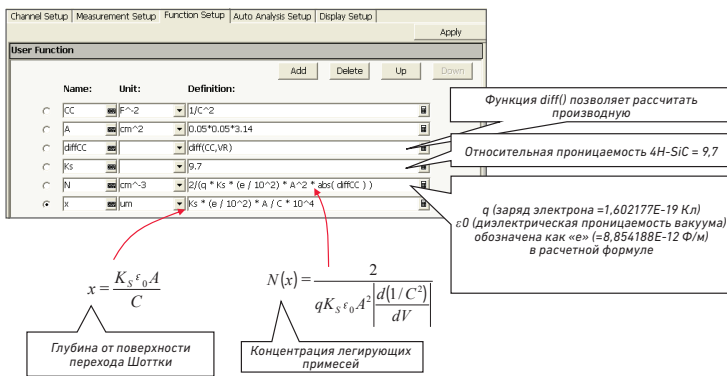


Рис. 26: Определение пользовательской функции для расчета профиля легирования на основе ВФХ

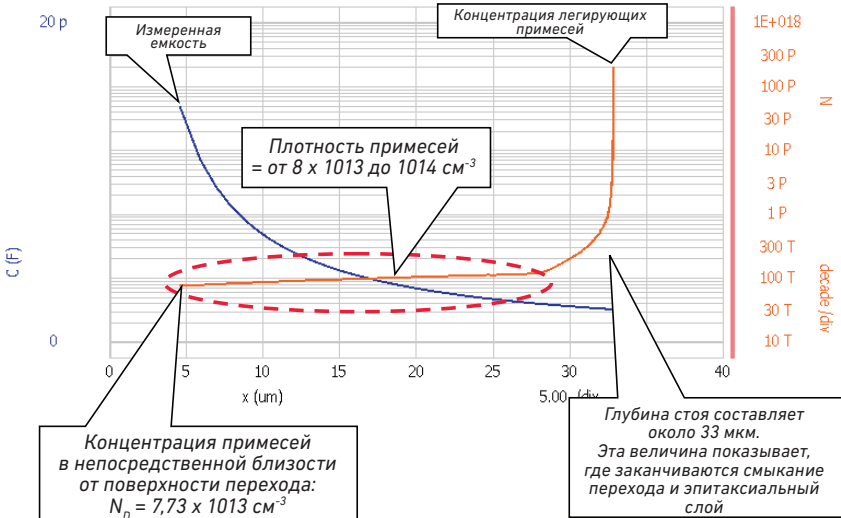


Рис. 27: Пример профиля легирования 4H-SiC диода Шоттки, полученного по результатам измерения ВФХ

Вывод

Анализатор Keysight B1505A обладает всеми измерительными возможностями (а также точностью и разрешением), которые свойственны традиционным параметрическим анализаторам полупроводниковых устройств, при этом обладает напряжением до 3000 В и токов до 20 А. Эффективность анализатора B1505A была продемонстрирована на реальных примерах измерения и определения характеристик полевых МОП-транзисторов большой мощности и силовых биполярных транзисторов.

В дополнение к тестированию традиционных полупроводниковых устройств, созданных с использованием кремния, анализатор B1505A также может использоваться для определения характеристик приборов, созданных с применением новых широкозонных материалов, которые являются весьма перспективным направлением в разработке высокотемпературных и силовых полупроводниковых приборов. В данных рекомендациях по применению приведены примеры измерений, выполненных для полупроводниковых приборов, созданных на основе алмазных структур и карбида кремния. Анализатор B1505A способен обеспечить стабильные и точные параметрические измерения как для существующих, так и для перспективных полупроводниковых приборов и позволит продолжать совершенствование силовых полупроводниковых элементов в течение еще многих лет.

References

1. Robert F. Pierret, *Semiconductor Device Fundamentals*, Addison-Wesley, MA, 1996.
2. Dieter K. Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization*, John Wiley & Sons, New York, 2006.

myKeysight

myKeysight

www.keysight.com/find/mykeysight

Персонализированное отображение интересующей вас информации.



www.axiestandard.org

Расширение AdvancedTCA® для измерительного и тестового оборудования (AXIe) представляет собой открытый стандарт, расширяющий функциональность платформы AdvancedTCA для решения общих задач испытаний и тестирования полупроводниковых приборов. Компания Keysight является членом-основателем консорциума AXIe. ATCA®, AdvancedTCA® и логотип ATCA – зарегистрированные в США товарные знаки PCI Industrial Computer Manufacturers Group.

www.lxistandard.org

Коммуникационный стандарт LAN eXtensions for Instrumentation (LXI) позволяет использовать все возможности технологий Ethernet и Web в ваших тестовых системах. Компания Keysight является одним из членом-основателей консорциума LXI.



www.pxisa.org

Платформа для модульного электронного приборного оборудования PCI eXtensions for Instrumentation (PXI) позволяет создавать на основе персональных компьютеров надежные и высокопроизводительные системы измерения и автоматизации.



Три года стандартной заводской гарантии

www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty

Keysight обеспечивает высочайшее качество продукции и снижение общей стоимости владения. Единственный производитель контрольно-измерительного оборудования, предоставляющий стандартную трехлетнюю гарантию на все свое оборудование.



Планы технической поддержки Keysight

www.keysight.com/find/AssurancePlans

До пяти лет поддержки без непредвиденных расходов гарантируют, что ваше оборудование будет работать в соответствии с заявленной производителем спецификацией, а вы будете уверены в точности своих измерений.



www.keysight.com/quality

Keysight Technologies, Inc.
Сертификация Системы управления качеством согласно нормам ISO 9001:2008 выполнена компанией DEKRA.



Keysight Channel Partners

www.keysight.com/find/channelpartners

Лучшее из двух миров: глубокие профессиональные знания в области измерительной техники и широкая номенклатура выпускаемой продукции компании Keysight в сочетании с удобствами, предоставляемыми торговыми партнёрами.

ATCA®, AdvancedTCA® и логотип ATCA – зарегистрированные в США товарные знаки PCI Industrial Computer Manufacturers Group.

Ранее данный документ назывался «Рекомендации по применению анализатора B1505-1».

Российское отделение
Keysight Technologies

115054, Москва, Космодамианская наб., 52, стр. 3
Тел.: +7 (495) 7973954
8 800 500 9286 (Звонок по России бесплатный)
Факс: +7 (495) 7973902
e-mail: tmo_russia@keysight.com
www.keysight.ru

Сервисный Центр
Keysight Technologies в России

115054, Москва, Космодамианская наб, 52, стр. 3
Тел.: +7 (495) 7973930
Факс: +7 (495) 7973901
e-mail: tmo_russia@keysight.com

(BP-07-01-14)