

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВОЛЬТ-ФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ KEITHLEY 4200-SCS

Г.В.Гудков, Б.И.Селезнев, А.В.Штро

FEATURES OF MEASUREMENTS OF LOW-FREQUENCY CAPACITANCE-VOLTAGE CHARACTERISTICS USING THE KEITHLEY 4200-SCS SEMICONDUCTOR DEVICE TESTING SYSTEM

G.V.Gudkov, B.I.Selesnev, A.V.Shtro

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, ggudkov@yandex.ru

Описываются методики, которые могут быть использованы для измерения низкочастотных вольт-фарадных характеристик с помощью Keithley 4200-SCS, такие как квазистатические измерения и измерения на сверхнизких частотах. Рассматриваются особенности подключения тестируемой структуры, обеспечивающие снижение влияния шумов, вопросы выбора оптимальных значений настраиваемых параметров тестирования, анализа и обработки результатов измерений. Обсуждаются методы снижения погрешности измерения, вносимой током утечки. Для сверхнизкочастотного метода приведена последовательность действий, выполняемых перед измерением вольт-фарадных характеристик новых структур с неизвестными значениями сопротивления утечки и тангенса угла потерь, включающая измерение вольтамперной характеристики и развертку по частоте при нулевом напряжении постоянного смещения. В результате оптимизируются значения начального и конечного напряжений развертки постоянного смещения и частоты измерений вольт-фарадных характеристик.

Ключевые слова: тестируемая структура, измерение, вольт-фарадная характеристика, параметр, смещение, развертка, частота

Для цитирования: Гудков Г.В., Селезнев Б.И., Штро А.В. Особенности измерений низкочастотных вольт-фарадных характеристик с использованием системы тестирования полупроводниковых приборов Keithley 4200-SCS // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2020. №5(121). С.10-16. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.5\(121\).10-16](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.5(121).10-16).

Techniques that can be used to measure low-frequency C-V characteristics with Keithley 4200-SCS are described, such as quasi-static measurements and measurements at very low frequencies. The features of the connection of the device under test, which reduce the influence of noise, the issues of choosing the optimal values of adjustable test parameters, analysis and processing of measurement results are considered. Methods for reducing the measurement error introduced by the leakage current are discussed. For the very-low-frequency method, a sequence of actions performed before measuring capacitance-voltage characteristics of new devices with unknown values of leakage resistance and dissipation factor is shown, including measurement of the current-voltage characteristic and frequency sweep at zero DC bias voltage. As a result, the values of the initial and final DC bias sweep voltages and the measurement frequency of capacitance-voltage characteristics are optimized.

Keywords: device under test, measurement, capacitance-voltage characteristics, parameter, bias, sweep, frequency

For citation: Gudkov G.V., Selesnev B.I., Shtro A.V. Features of measurements of low-frequency capacitance-voltage characteristics using the Keithley 4200-SCS semiconductor device testing system // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2020. №5(121). P.10-16. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.5\(121\).10-16](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.5(121).10-16).

Вольт-фарадные (C-V) измерения широко используются для определения различных параметров полупроводниковых структур, таких как концентрация и профиль распределения легирующей примеси, время жизни носителей, толщина окисла, заряд в окисле и на границе раздела и многое другое. Измерения емкости обычно проводятся на переменном токе с помощью измерительных приборов мостового типа. Эти приборы, как правило, выполняют измерения емкости и импеданса на частотах от 1 кГц до 10 МГц. Однако часто необходима более низкая частота измерения емкости некоторых структур, например МОП-конденсаторов. Характеристическое время, определяющее образование инверсного слоя в такой структуре, составляет порядка $2N_a\tau_0/n_i$, где N_a — концентрация примеси, τ_0 — время жизни неосновных носителей у поверхности, n_i — собственная концентрация [1]. Для типовых значе-

ний времени жизни (1 мкс) и концентраций примеси (10^{15} см⁻³) это время оценивается примерно в 0,2 с. Следовательно, для того, чтобы измерить низкочастотную C-V характеристику, малосигнальное измерительное напряжение должно изменяться с частотой порядка единиц Гц. Низкочастотные C-V измерения также используются для исследования в некоторых материалах эффектов захвата носителей заряда медленными ловушками.

Для выполнения C-V измерений в широком диапазоне частот система 4200-SCS включает вольт-фарадный блок 4210-CVU [2]. Однако при его использовании нижняя частота измерений составляет 1 кГц, что не позволяет измерять составляющие емкости структуры, определяемые инверсным слоем и медленными поверхностными состояниями. Выходом из данной ситуации является использование для C-V измере-

ний двух блоков источников-измерителей 4200-SMU, изначально предназначенных для измерения вольт-амперных (I-V) характеристик. Предпосылкой к этому явилось то, что эти блоки при использовании в качестве измерителей с опцией токового предусилителя 4200-PA способны измерять очень малые токи, в том числе в диапазоне до 1 пА. Еще одним преимуществом стало использование триаксиальных измерительных кабелей, которые не только защищают от помех, но и значительно снижают ток утечки. Когда блок 4200-SMU выступает в роли источника, он может быть запрограммирован таким образом, чтобы обеспечить требуемые параметры сигнала, воздействующего на тестируемый прибор. В зависимости от вида воздействия, формируемого SMU-источником, в системе 4200-SCS реализованы два метода измерения низкочастотных вольт-фарадных характеристик. Это RampRate метод, представляющий собой разновидность квазистатического метода, и метод измерения на сверхнизких частотах. Ниже подробно рассматриваются оба метода.

Реализация квазистатического метода измерения C-V характеристик с использованием системы Keithley 4200-SCS

На практике низкочастотные C-V кривые чаще всего получают при использовании квазистатического метода [3, 4]. Суть метода заключается в измерении тока смещения $I_{см}$, протекающего через МОП-структуру, при линейной развертке напряжения затвор-подложка, при этом значение тока пропорционально емкости структуры [5]. Таким образом, задавая определенное значение скорости линейного нарастания напряжения и измеряя значение тока смещения, можно определить значение емкости:

$$C = \frac{I_{см}}{dV/dt}. \quad (1)$$

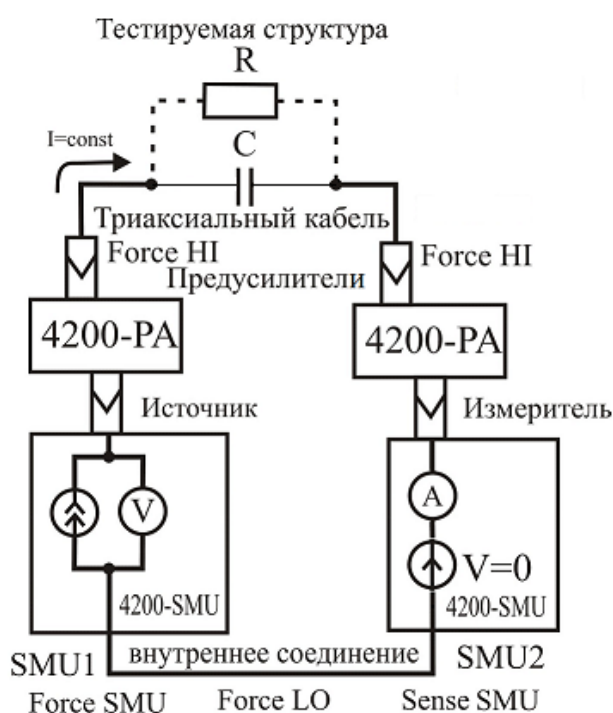


Рис.1. Схема измерения низкочастотной вольт-фарадной характеристики квазистатическим RampRate методом

Квазистатический метод измерения C-V характеристик с помощью Keithley 4200-SCS носит название RampRate и имеет свои особенности по сравнению с традиционным, поскольку использует заряд и разряд емкости постоянным током [6]. Базовая схема подключения емкости для данного метода показана на рис.1. Два блока 4200-SMU с предусилителями 4200-PA подключены к каждой стороне тестируемой структуры, в качестве которой в данном случае выступает конденсатор. Метод работает в ограниченном диапазоне токов, поэтому емкость тестируемой структуры должна находиться в пределах от 1 пФ до примерно 400 пФ. Суть метода поясняют временные диаграммы (рис.2). Емкость тестируемой структуры заряжается до заданного постоянного напряжения с использованием одного из SMU, именуемого ForceSMU, в качестве источника тока. Значение тока заряда составляет 100 пА. После того, как емкость будет заряжена, она некоторое время выдерживается при данном напряжении, затем постоянный ток противоположной полярности начинает ее разряжать. В то время как ForceSMU измеряет напряжение через интервалы времени ΔT , второй SMU, который называется MeasureSMU, измеряет ток разряда. Процесс продолжается до тех пор, пока напряжение на структуре не станет равным и противоположным по знаку напряжению до начала разряда. Из измеренных значений напряжения, тока и времени определяется емкость по аналогии с (1).

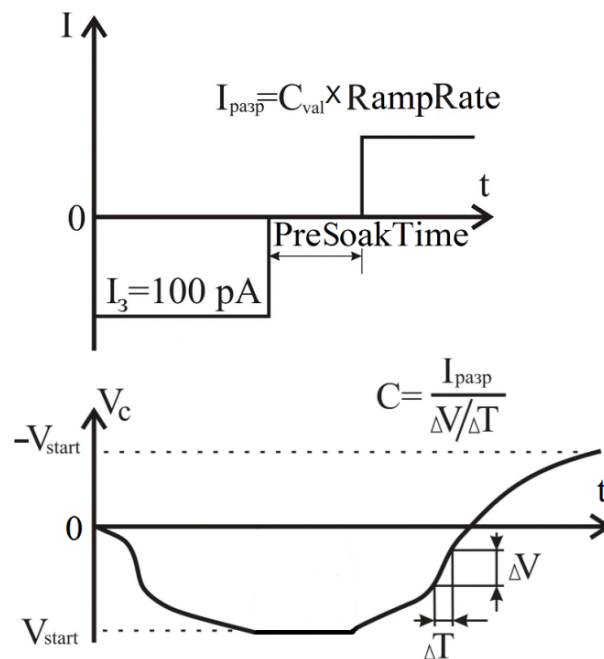


Рис.2. Временные диаграммы тока и напряжения на емкости

Для проведения квазистатических C-V измерений с использованием описанного метода в программное обеспечение системы включен пользовательский модуль meas_qscv, расположенный в пользовательской библиотеке QSCVulib. На его основе разработан пользовательский тестовый модуль (UTM) CVsweep, входящий в проект qscv.kpr. Окно проекта показано на рис.3.

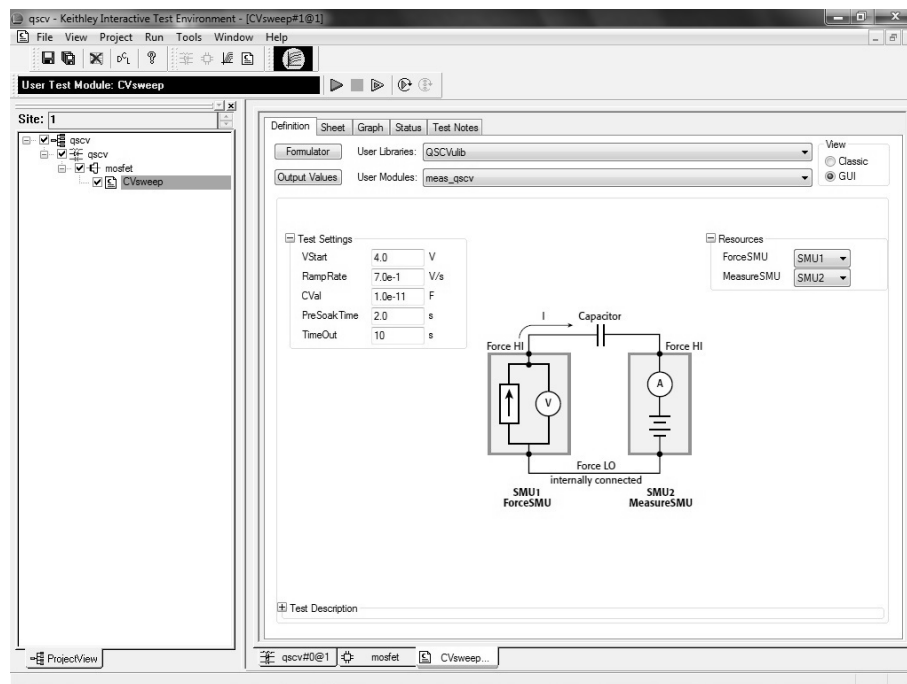


Рис.3. Окно проекта qscv.kpr

Перед началом измерений пользователь должен указать, какой из SMU будет выполнять функцию ForceSMU, а какой — MeasureSMU. После этого необходимо задать напряжение $VStart$ ($-200 \div +200$ В), до которого заряжается емкость тестируемой структуры, время $PreSoakTime$ ($0 \div 60$ с), в течение которого она выдерживается при этом напряжении до начала разряда, предполагаемое значение емкости $CVal$ ($10^{-12} \div 400 \cdot 10^{-12}$ Ф), скорость нарастания напряжения $RampRate$ ($0,1 \div 1$ В/с). Разрядный ток определяется программой из соотношения

$$I_{ramp} = CVal \times RampRate. \quad (2)$$

Если рассчитанное значение тока оказывается менее 1 пА или более 100 пА, то оно устанавливается равным указанным значениям соответственно. Еще один параметр, задаваемый пользователем, $TimeOut$ ($10 \div 60$ с), ограничивает время, в течение которого продолжается заряд емкости током 100 пА. В некоторых случаях, таких как короткое замыкание в тестируемом приборе, напряжение на нем не может достигнуть $VStart$. Тогда по истечении времени $TimeOut$ заряд прекращается и выдается сообщение об ошибке. Следует отметить, что пользователь не может задать интервал времени, через который будут производиться измерения напряжения и тока. Он остается постоянным при любых значениях вводимых параметров. Как следствие, чем выше скорость нарастания напряжения, тем меньше точек будет в измеренной характеристике.

Измерения заканчиваются, когда напряжение на тестируемом приборе станет равно, но противоположно по знаку напряжению $VStart$. Результаты будут представлены в виде таблицы во вкладке Sheet и в виде графика зависимости $C(V)$ во вкладке Graph.

Наибольшее влияние на качество измерений оказывает правильный выбор параметров $CVal$ и $RampRate$, так как они определяют разрядный ток (2). Если введенное предполагаемое значение емкости

$CVal$ значительно ниже реального, то это может быть причиной высокого уровня шумов. В противном случае может оказаться недостаточно точек для построения плавной C-V характеристики. Подобным образом влияет и скорость нарастания напряжения $RampRate$. Желательно выбирать этот параметр максимально возможным, но в то же время обеспечивающим достаточное число точек для построения характеристики. Основным фактором, ограничивающим максимально допустимую скорость нарастания, является время жизни неосновных носителей заряда [7].

Для уменьшения влияния шумов при обработке результатов измерений может быть использована функция $MAVG$ (moving average, т. е. скользящее среднее), доступная во вкладке Formulator. Эта функция применяется к столбцу результатов измерений, при этом указывается число результатов, которые усредняются. Оно должно быть выбрано оптимальным, чтобы сгладить шумы, не потеряв при этом форму C-V характеристики (рекомендуемое значение — 3).

Сверхнизкочастотный (VLF) метод измерений C-V характеристик

Система 4200-SCS задействует новую методику, использующую преимущества, которые дает применение блоков источников-измерителей 4200-SMU совместно с блоками предварительных усилителей 4200-PA при измерении низких значений тока, для выполнения измерений C-V характеристик в диапазоне частот от 10 мГц до 10 Гц [5]. Данный метод, использующий синусоидальный тестовый сигнал, позволяет измерять очень малые емкости на заданной низкой частоте и проводить низкочастотные CV измерения очень высокоимпедансных устройств, вплоть до $>10^{15}$ Ом. Другие измерители импеданса на переменном токе обычно ограничиваются значениями примерно от 10^6 до 10^9 Ом. Метод также отличается пониженным уровнем

шумов по сравнению с традиционными квазистатическими методами CV измерений.

На рис.4 приведена упрощенная схема конфигурации SMU, используемой для обеспечения сверхнизкочастотных измерений импеданса. Эта конфигурация включает систему 4200-SCS, укомплектованную двумя SMU с предусилителями 4200-PA, подключенными к обеим сторонам тестируемой структуры.

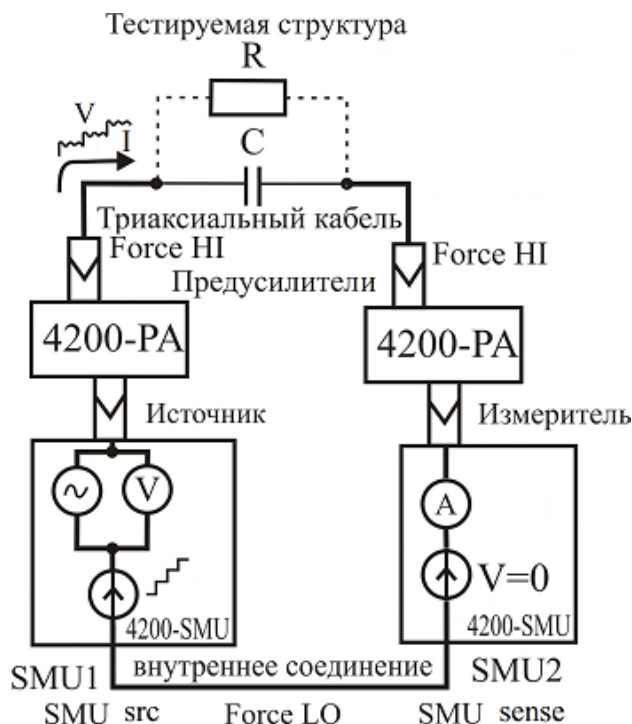


Рис.4. Схема измерения низкочастотной вольт-фарадной характеристики VLF методом

SMU1, именуемый как "smu_src" (источник), формирует постоянное смещение (или его развертку) с наложенным на него переменным тестовым сигналом, а также измеряет переменное напряжение. На выходе блока SMU2, именуемом "smu_sense" (измеритель), поддерживается нулевой уровень постоянной составляющей напряжения. Данный блок используется только для измерения переменного тока и должен быть подключен к высокоимпедансному выводу, например к затвору, если тестируется МОП-структура. Большинство таких структур имеют единичную контактную площадку затвора на верхней стороне пластины, обратная сторона пластины используется как общий контакт для всех структур. Выход SMU1 подключается к держателю пластин, при этом требуется обеспечить хороший контакт между держателем и обратной стороной пластины. Не допускается подключать SMU, выполняющий функцию измерителя тока, со стороны держателя пластин, поскольку это приводит к значительно большему уровню шумов. Соединения должны быть выполнены триаксиальными кабелями из комплекта поставки. В кабельном тракте от предусилителя 4200-PA до тестируемой структуры не должно быть любых коммутирующих устройств, включая дистанционный усилитель-коммутатор модели 4225-RPM.

Выборки при измерениях напряжения и тока делаются одновременно, в течение нескольких периодов. Это позволяет определить отношение их значений в различные моменты времени. В дальнейшем посредством математической обработки извлекаются результирующие выходные параметры, которые включают импеданс (Z), фазовый угол (θ), емкость (C), проводимость (G), активное сопротивление (R), реактивное сопротивление (X) и тангенс угла потерь (D). Поскольку метод работает в ограниченном диапазоне частот, емкость тестируемой структуры должна быть в диапазоне от 1pF до 10nF. В табл.1 приведены характеристики сверхнизкочастотного метода C-V измерений.

Таблица 1
Основные характеристики сверхнизкочастотного метода

Измеряемые параметры	Cp, Gp, F, Z, theta, R, X, Cs, Rs, D, время
Диапазон частот	от 10 мГц до 10 Гц
Диапазон измерений емкости	от 1 пФ до 10 нФ
Стандартное разрешение	3,5 цифры, минимальное 10 фФ
Переменный тестовый сигнал	от 10 мВ до 3 В (среднее квадратическое значение)
Постоянное смещение	± 20 В минус АС сигнал, максимальный ток 1 мкА

Программное обеспечение системы 4200-SCS для реализации сверхнизкочастотных CV измерений включает в себя пять пользовательских модулей, являющихся основой UTM, входящих в проект VLF_CV_Examples (рис.5). Характеристики пользовательских модулей приведены в табл. 2

Таблица 2
Пользовательские модули в пользовательской библиотеке VLowFreqCV

Пользовательский модуль	Описание
vlfcv_measure	Измеряет C, G, Z, theta, R+jX при фиксированном постоянном смещении
vlfcv_measure_sweep_bias	Измеряет C, G, Z, theta, R+jX, время при развертке постоянного напряжения
vlfcv_measure_sweep_bias_fixed_range	Измеряет C, G, Z, theta, R+jX, время при развертке постоянного напряжения. Измерения производятся в фиксированном диапазоне токов, который определяется ожидаемым C, ожидаемым R и максимальным напряжением постоянного тока
vlfcv_measure_sweep_freq	Измеряет C, G, Z, theta, R+jX, время на нескольких заданных пользователем тестовых частотах
vlfcv_measure_sweep_time	Измеряет C, G, Z, theta, R+jX как функцию времени

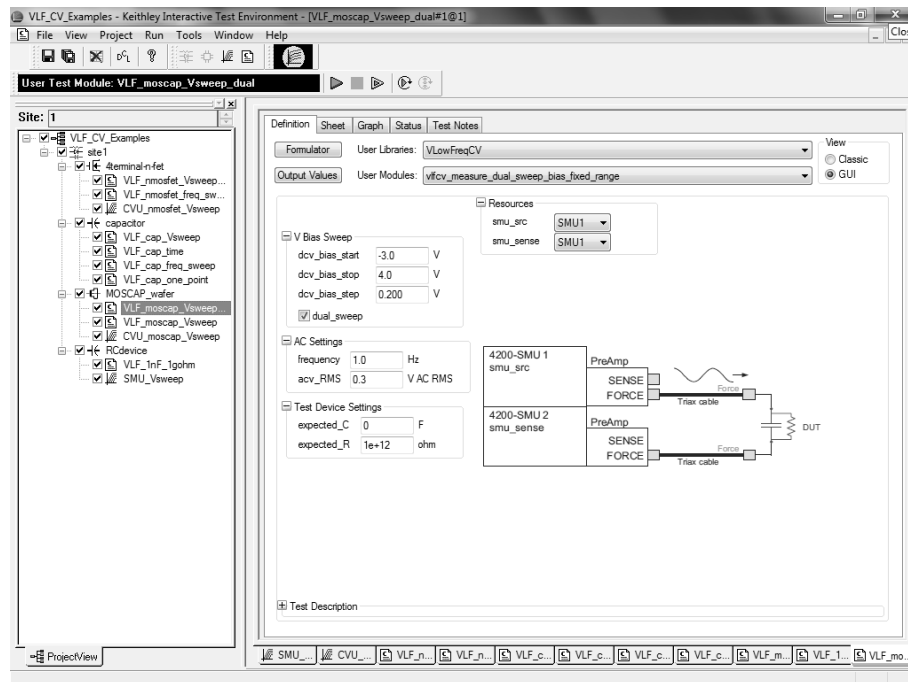


Рис.5. Окно проекта VLF_CV_Examples

Список и диапазон используемых параметров тестирования приведен в табл.3.

Таблица 3
Настраиваемые параметры в UTM
VLF_moscap_Vsweep_dual

Параметр	Диапазон	
smu_src	SMUn	SMU — источник постоянного и переменного напряжения, измеритель переменного напряжения: SMU1, SMU2, SMU3...
smu_sense	SMUn	SMU — измеритель постоянного тока: SMU1, SMU2, SMU3...
frequency	от 0,01 до 10	Тестовая частота в Гц
expected_C	от 10^{-12} до 10^{-8}	Ожидаемая емкость прибора, Ф, для автоматического определения используется 0
expected_R	от 10^6 до 10^{14}	Ожидаемое параллельное сопротивление, Ом
acv_RMS	от $30 \cdot 10^{-3}$ до 3	Среднее квадратическое значение переменного напряжения, В
dcv_start	± 20 минус $(acv_RMS \cdot \sqrt{2})$	Начальное постоянное напряжение развертки, В
dcv_stop	± 20 минус $(acv_RMS \cdot \sqrt{2})$	Конечное постоянное напряжение развертки, В
dcv_step	± 20 минус $(acv_RMS \cdot \sqrt{2})$	Шаг развертки, В. Максимальное число шагов — 512
dual_sweep	0 или 1	0 (флажок не установлен) — единичная развертка, 1 (флажок установлен) — двойная развертка

Значения ожидаемой емкости (expected_C) и ожидаемого параллельного сопротивления (expected_R) определяют, какой диапазон тока будет использоваться при выполнении измерения. Однако выбор конкретных значений обычно не требуется, так как установка expected_C = 0 позволит программе оценить значения C и R для дальнейшего использования.

После выполнения теста измеренные параметры будут возвращены на вкладку Sheet и могут быть сохранены как .xls-файл, а также представлены в виде графика на вкладке Graph и сохранены в одном из графических форматов. Из результатов тестирования могут быть извлечены дополнительные параметры структур с использованием математических функций, доступных в окне Formulator. Чтобы сравнить результаты как низко-, так и высокочастотных C-V измерений на одном графике, данные могут быть скопированы из одного тестового модуля в другой.

Параллельное сопротивление тестируемого прибора является ключевым аспектом, определяющим качество измерения емкости на низких частотах, поскольку оно вызывает дополнительный постоянный ток, что снижает точность измерения. Это параллельное сопротивление на данной частоте оценивается по значению тангенса угла потерь D (от англ. dissipation factor). Для простейшей параллельной модели:

$$D = \text{реактивное сопротивление} / \text{активное сопротивление} = 1 / \omega RC = 1 / 2\pi f RC,$$

где f — тестовая частота, в Гц; R — параллельное сопротивление испытательного устройства, в Ом; C — емкость тестируемого устройства, в Ф.

Если структура является чисто емкостной (ток утечки очень низкий или практически отсутствует, $D < 0,1$), то никаких дополнительных действий перед измерением C-V характеристики не требуется.

Однако если тип структуры новый или его электрические характеристики неизвестны, то предварительно необходимо определиться с параметрами тестирования. Прежде всего это касается диапазона напряжений постоянного смещения, так как он определяет ток утечки. С этой целью в проект включен интерактивный тестовый модуль (ITM) SMU_VSweep, позволяющий измерять I-V характеристики. В качестве начального и конечного значения напряжения развертки для I-V измерения, выполняемого с использованием этого модуля, выбираются желаемые минимальное и максимальное напряжения смещения постоянного тока, которые будут использоваться для C-V измерений. Этот тест поможет определить, является ли ток утечки достаточно низким, чтобы обеспечить точность и повторяемость результатов. По окончании теста оценивается значение тока во вкладках Sheet или Graph. Для достижения наилучших результатов максимальный ток должен быть менее ± 1 мкА. Если ток более ± 1 мкА, то напряжение смещения необходимо уменьшить. Это скорректированное значение используется в дальнейшем при C-V измерениях.

Следующим шагом является выполнение теста VLF_cap_freq_sweep с целью определения значения D. Необходимо ввести нужные тестовые частоты, используя всего пять-десять точек, чтобы охватить нужный частотный диапазон. Если требуется только одна тестовая частота, то используется одноточечный тест VLF_cap_one_point. Предполагаемые значения емкости и сопротивления устанавливаются по умолчанию: expected_C = 0 Ф и expected_R = $1\text{E}+12$ Ом. Среднее квадратическое значение тестового сигнала acv_RMS = 0,3 В, напряжение смещения dc_bias = 0 В. По окончании тестирования производится оценка значения D в столбце meas_D вкладки Sheet. Если $|\text{meas_D}| < 1$, то результаты являются приемлемыми для используемых частот и значений постоянного смещения, при которых ток был менее ± 1 мкА в тесте SMU_VSweep. Если $|\text{meas_D}| < 10$, то результаты должны быть справедливыми для dc_bias = 0 В. Если $|\text{meas_D}| > 10$, тогда данная реализация низкочастотных C-V измерений может дать неприемлемые результаты или результаты с довольно большими погрешностями. Следует учесть, что подходящие низкие значения D при dc_bias = 0 еще не являются гарантией того, что не появятся большие погрешности по мере увеличения напряжения постоянного смещения.

Теперь можно переходить к настройке параметров желаемого теста, например VLF_moscap_Vsweep_dual (рис.5). В качестве начального dc_bias_start и конечного dc_bias_stop напряжений постоянного смещения берутся значения, определенные на предыдущем шаге. Как уже говорилось ранее, использование expected_C = 0 приведет к автоматическому обнаружению как значений C, так и значений R. Остальные параметры устанавливаются в пределах значений, указанных в табл.3, после чего можно запустить тест.

По окончании тестирования необходимо проверить статус, возвращенный из теста. Status = 0 оз-

начает, что программа не обнаружила никаких ошибок. Если значение статуса ненулевое, необходимо обратиться к таблице кодов ошибок, чтобы увидеть объяснение и предложения по устранению неполадок. Даже при нулевом статусе достоверность данных все равно должна быть оценена при просмотре результатов измерений во вкладке Sheet.

Заключение

Таким образом, квазистатический (RampRate) и сверхнизкочастотный (VLF) методы, несмотря на различные принципы измерений, имеют практически одинаковую аппаратную реализацию. Она включает два источника-измерителя 4200-SMU с предварительными усилителями 4200-PA, один из которых выполняет функцию источника (постоянного тока или переменного напряжения), другой — измерителя тока пикоамперного диапазона. Оба метода очень критичны к току утечки, поэтому нежелательно использовать большие значения напряжения смещения. Причиной большой погрешности сверхнизкочастотного метода также является повышенное значение тангенса угла потерь D, который зависит не только от тока утечки, но и от частоты, поэтому она выбирается такой, чтобы значение D не превышало 0,1. С другой стороны, значение частоты, как и скорость нарастания напряжения в первом методе, ограничены временем жизни неосновных носителей заряда.

Снижение влияния шумов достигается правильным подключением и экранированием тестируемой структуры, использованием триаксиальных кабелей (что позволяет также снизить ток утечки) и применением функции скользящего среднего при обработке результатов измерений.

Недостатком обоих методов является отсутствие опции, аналогичной CVU Connection Compensation (компенсация соединений), используемой при выполнении высокочастотных CV-измерений и позволяющей исключить влияние измерительных кабелей и контактных сопротивлений.

1. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем / Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 630 с.
2. Гудков Г.В., Желаннов А.В., Ионов А.С. и др. Измерительный комплекс характеристик микроструктур на пластине // Вестник НовГУ. Сер.: Техн. науки. 2016. №7 (98). С.12-16.
3. Гуртов В. А. Твердотельная электроника: Учеб. пособие. М., 2005. 492 с.
4. Nicollian E.H., Brews J.R. MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology. N.Y.: Wiley, 1982. 928 p.
5. Андреев Д.В., Кулагин В.С. Автоматизированная установка измерения квазистатических вольт-фарадных характеристик МДП-структур [Эл. ресурс] // Эл. журнал: наука, техника и образование. 2020. №2 (29). С.59-63. URL: <http://nto-journal.ru/uploads/articles/c4102ed39c30af9585781108ac4a7f42.pdf> (дата обращения 25.09.2020).
6. C-V Testing for Components and Semiconductor Devices – Applications Guide [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tek.com/search?keywords=4200-SCS&page=8> (дата обращения 30.09.2020).
7. Sadwick L. A comparison of commercially available quasistatic meters and methods // Journal of Electronic Materials. 1990. V.19. Issue 7. P.637-650.

References

1. Muller R., Kamins Th. Device electronics for integrated circuits. New York, John Wiley & Sons, 1986. 554 p. (Russ. ed.: Elementy integral'nykh skhem. Moscow, Mir Publ., 1989, 630 pp.).
2. Gudkov G.V. et al. Izmeritel'nyi kompleks kharakteristik mikrostruktur na plastine [Measuring complex for characterization of microstructures on wafers]. Vestnik NovGU. Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences, 2016, no.7(98), p.12-16.
3. Gurtov V.A. Tverdotel'naya elektronika: Ucheb. Posobie [Solid State Electronics Study Guide]. Moscow, 2005, 492 p.
4. Nicollian E.H. MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology. New York, Wiley, 1982, 928 p.
5. Andreev D.V., Kulagin V.S. Avtomatizirovannaya ustanovka izmereniya kvazistaticheskikh vol't-faradnykh kharakteristik MDP-struktur [Automatized Setup to Measure Quasistatic C-V Characteristics Of MIS Structures]. Nauka, tekhnika i obrazovanie. 2020, no. 2 (29), pp. 59-63. Available at: <http://nto-journal.ru/uploads/articles/c4102ed39c30af9585781108ac4a7f42.pdf> (accessed 25.09.2020)
6. C-V Testing for Components and Semiconductor Devices – Applications Guide. Available at: <https://www.tek.com/search?keywords=4200-SCS&page=8> (accessed 25.09.2020).
7. Sadwick L. A comparison of commercially available quasistatic meters and methods. Journal of Electronic Materials, 1990, no. 19, pp. 637-650.