

ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛЬТ-ФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ — ВЫБОР СОВРЕМЕННОГО БЮДЖЕТНОГО РЕШЕНИЯ

SEMICONDUCTOR C-V CHARACTERISTIC MEASUREMENT — CHOOSING UP-TO-DATE LOW-COST SOLUTION

Шумский И.А. (I. Shumskiy), к.т.н.

Современная электрофизика полупроводников немислима без измерения вольт-фарадных характеристик (ВФХ), или т.н. CV-метрии, что подразумевает измерение емкости как функции от приложенного постоянного напряжения смещения. Именно эти измерения дают возможность быстрого определения базовых параметров слоев полупроводников и диэлектриков, которые затруднительно измерить прямыми методами. В их числе: тип проводимости и концентрация легирующих примесей полупроводника, характеристики глубоких энергетических уровней, генерационное время неравновесных носителей заряда, плотности поверхностных состояний и их распределение по энергиям, толщина диэлектрика, напряжения плоских зон, пороговые напряжения МОП-структур, и др.

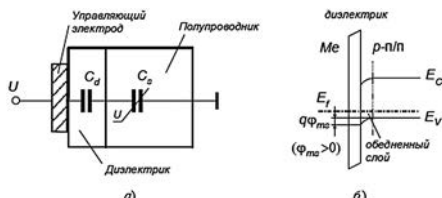


Рис. 1. МОП-структура: а) конструкция и б) энергетическая диаграмма, иллюстрирующая возникновение области пространственного заряда в полупроводнике

В основе вольт-фарадных методов измерений лежит хорошо проработанная и многократно подтвержденная практикой теория формирования в приповерхностной области полупроводников пространственного заряда и связанных с ней емкостей (рис. 1), под воздействием приложенной к этой структуре потенциала (напряжения).

Перераспределение носителей заряда в полупроводнике (электронов или дырок), возникающее под воздействием внешнего поля, а также заряда поверхностных состояний на границе окисел-полупроводник, приводит к воз-

Таблица 1

ТИПОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРИ АС-МЕТОДЕ

Параметры	Типичные значения
Частота тестового сигнала	От 10 кГц до 1 МГц
Диапазон емкостей	От 0,0001 до 1000 пФ
Тестовый сигнал	~ 20-30 мВсвз
Напряжение смещения	От -40 В до +40 В

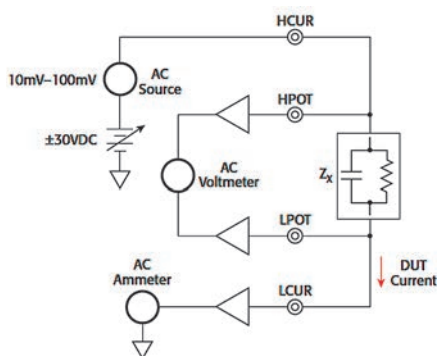


Рис. 2. Общая упрощенная схема измерений ВФХ методом АС

никновению областей обогащения концентрации основных носителей заряда (или обеднения концентрации носителей, или даже инверсии (изменение типа основных носителей)), что существенно меняет эффективную емкость измеряемой структуры (именно поэтому измерения и называют Вольт-Фарадными), что в рамках существующей электрофизической модели позволяет выделить из экспериментальных ВФХ требуемые электрофизические параметры.

Объектами измерения ВФХ являются разнообразные полупроводниковые структуры и приборы, как-то: полупроводниковые диоды, транзисторы и конденсаторы МОП-типа (Металл-Оксид-Полупроводник), диоды Шоттки, MEMS (микромеханические микроструктуры), ячейки солнечных батарей и т.п.

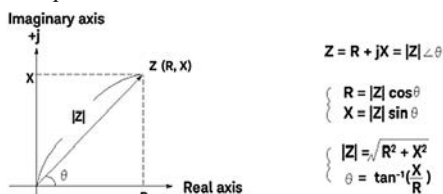


Рис. 3. Комплексный импеданс тестируемой структуры — векторное представление

Для разных объектов измерений используются разные методы C(V) измерений.

Наиболее популярный и массовый метод это измерения ВФХ переменным напряжением (АС-метод). Он хорошо подходит для измерения обычных малоомных МОП-транзисторов и конденсаторов и не требует дорогостоящего

оборудования, как в других методах. Недостаток этого метода — достаточно сложная техника коррекции ошибок измерения, а также тот момент, что измерения емкости тестовых структур проходят на частотах, подчас существенно ниже тех, которые будут использоваться в реальных приборах, что предполагает необходимость интерполяции результатов в область высоких частот.

Общая упрощенная схема измерений ВФХ методом АС приведена на рисунке 2.

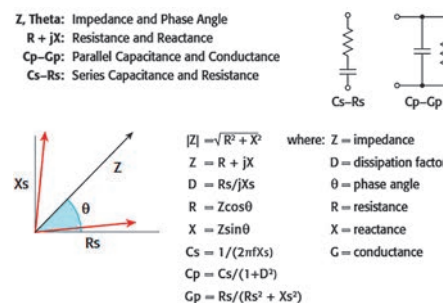


Рис. 4. Соотношение между полным импедансом и емкостью в последовательном и параллельном режиме

Как видно, при АС-технике тестовый образец подвергается воздействию генератора постоянного напряжения смещения, а также небольшого тестовому переменному напряжению для измерения емкости. Все это поддерживается 4-проводной схемой подключения образца для исключения влияния сопротивления кабелей. Измерение переменного тока и напряжения на тестируемом образце, а также фазового сдвига между ними, происходит, как правило, методом моста с автобалансировкой и позволяет определить полный комплексный импеданс ($Z = R + jX$) тестируемой структуры (рис. 3).

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНАЯ И ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ СХЕМА ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ АС-МЕТОДЕ

Для определения емкости из измеренного методом АС комплексного импеданса существует две модели импеданса: параллельная и последовательная. В последовательной модели полный импеданс Z выражается сопряженными величинами — последовательной емкостью (C_s) и последовательным сопротивлением (R_s). В

параллельной модели полный импеданс, точнее его обратная величина — полная комплексная проводимость (адмиттанс) Y выражается двумя сопряженными величинами: параллельной емкостью (C_p) и параллельной проводимостью (G_p) (рис. 4).

При измерении ВФХ МОП-структуры помимо емкости важно при определить коэффициент рассеяния D (отношение между реальной и мнимой частью комплексного импеданса), т.к. это лучшая метрика для оценки качества окончательной ВФХ. Приборы с высоким последовательным сопротивлением могут вызвать большие ошибки измерения и анализа емкости без учета этого фактора. Высокий коэффициент рассеяния, вызванный последовательным сопротивлением в эквивалентной схеме МОП-структуры с контактом через подложку, может вызвать ошибки в измерении емкости окисла МОП структуры, что, в свою очередь, приведет к ошибкам определения концентрации примеси в подложке.

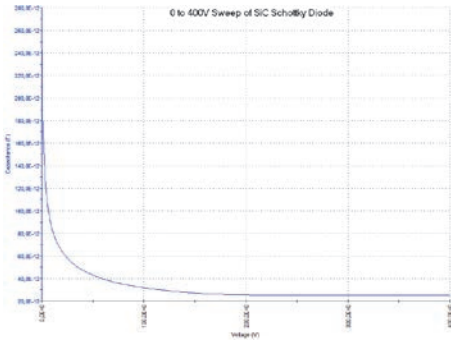


Рис. 5. ВФХ высоковольтного диода Шоттки

В реальных измерениях C_p и C_s могут заметно отличаться по величине, и правильное использование параллельной или последовательной модели определяется типом тестируемой полупроводниковой структуры, точнее ее эквивалентной схемой. Стоит также отметить, что эквивалентная схема прибора может меняться в разных режимах его работы и для определения разных ее параметров можно использовать разные режимы измерения.

По этой причине, выбор режима автоматического измерения может стать причиной расхождений результатов измерений. К счастью, измеренные значения последовательного и параллельного режима взаимосвязаны с помощью простых уравнений, которые являются функцией коэффициента рассеяния (D) (см. таблицу 2).

Таким образом, измерения в после-

Таблица 2

СВЯЗЬ МЕЖДУ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМИ ВЕЛИЧИНАМИ ЕМКОСТИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ

Series	Parallel	Dissipation factor
		(Same value for series and parallel)
Capacitance	$C_s = C_p / (1 + D^2)$	$D = R_s / X_s = \omega C_s R_s$
Inductance	$L_s = L_p (1 + D^2)$	$D = G_p / B_p = G_p / (\omega L_s)$
Resistance	$R_s = R_p (1 + D^2)$	$D = G_p / B_p = \omega L_p G_p$

РЕЖИМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВФХ ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ТЕСТЕРА KEITHLEY 4200A-SCS

Модель Keithley 4200A-SCS	Диапазоны измерений емкости	Методы/частоты снятия ВФХ			Диапазон напряжений смещения
		Квазистационарные ВФХ	Ультранизкие частоты	АС-метод	
С опцией 4200-PA	1 пФ-10 нФ	+	10 мГц-10 Гц	—	от -200 В до +200 В
С опцией 4210-CVU	1 пФ-1 мкФ	—	—	1 кГц-10 МГц	от -30 В до +30 В
С опцией 4210-CVU + 4200-CVU-PWR	1 пФ-1 мкФ	—	—	100 кГц-10 МГц	от -200 В до +200 В

довательно режим могут быть преобразованы в параллельные и наоборот.

НАПРЯЖЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ

В обычных режимах CV-метрии полупроводниковых материалов необходимый диапазон напряжений смещения обычно не превышает ± 10 В, однако есть ряд приборов, в которых для информативных измерений ВФХ требуются более высокие напряжения смещения. Среди них LDMOS структуры, диэлектрики с пониженной диэлектрической проницаемостью, МЕМС-приборы, органические TFT дисплеи и фотодиоды, стабилитроны (диоды Зенера), высоковольтные диоды Шоттки (рис. 5) и др. В этом случае необходимы напряжения смещения в несколько сотен вольт. Обычно это достигается использованием внешних по отношению к измерителю ВФХ приборов-источников напряжения смещения, тогда как низковольтные источники смещения обычно встроены в сам измеритель ВФХ.

ЧАСТОТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Другим важным параметром для ВФХ является частота переменного на-

пряжения тестового сигнала. Обычный диапазон частот тестового сигнала для метода АС-измерений лежит в пределах от 10 кГц до 1 МГц. ВФХ МОП-конденсатора на низкой и высокой частоте тестового сигнала заметно отличаются (рис. 6).

Хотя большинство измерений ВФХ делаются на частотах до 1 МГц, более высокая тестовая частота (более 1 МГц) может потребоваться, к примеру, для тестирования МОП транзисторов с толщиной окисла менее 2 нм, т.к. обычные режимы измерения ВФХ в этом случае невозможны из-за высоких токов утечки. Компания Keysight Technologies предлагает для подобных целей высокочастотные измерители LCR, которые могут снимать ВФХ в диапазоне частот до 120 МГц (модель E4990A) и даже до 3 ГГц (модель E4991B).

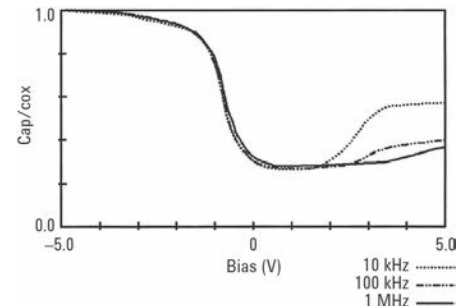


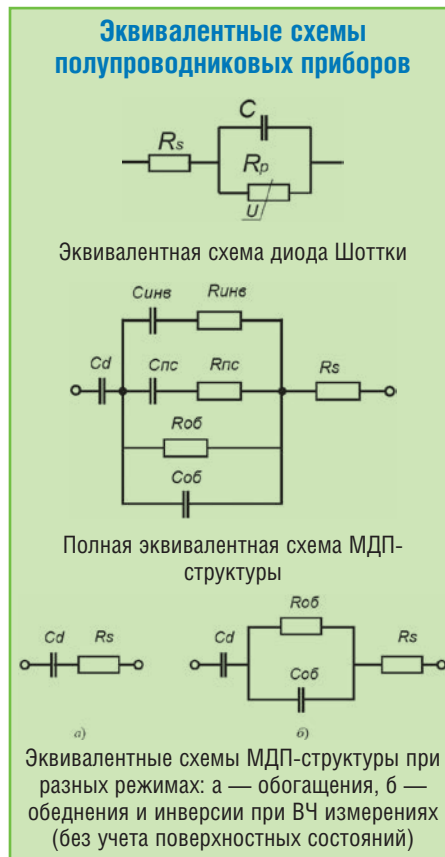
Рис. 6. ВФХ МОП-конденсатора при разных частотах измерения

С другой стороны низкочастотные (ниже 10 Гц) измерения емкости часто необходимы для получения параметров некоторых тестовых устройств, таких как тонкопленочные транзисторы (TFT) и МЭМС-структур (MEMS) и др. Низкочастотные измерения ВФХ позволяют изучать феномены, связанные с ловушечными уровнями в диэлектрике, а также тестировать приборы, имеющие очень высокое сопротивление (до 10^9 Ом).

При низкочастотном и ультра-низкочастотном (квазистатическом) методах измерений, измеряется именно емкость, а не комплексный импеданс, как в АС-методе. Общая идея низкочастотных измерений емкости — прецизионное измерение во времени токов зарядки / разрядки при подаче вольтовых ступенек на тестируемый образец.

ЭКСТРАКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗ CV-ХАРАКТЕРИСТИК

Финишным элементом анализа ВФХ является экстракция электрофизических параметров тестируемого полупро-



водниковых структур из собранных экспериментальных данных.

Следует помнить, что существуют принципиальные ограничения возможностей метода экстракции электрофизических параметров из собранных ВФХ, некоторые из них:

- емкость: от 10 фФ до 1 мкФ;
- сопротивление от 0,1 Ом до 100 МОм;
- подзатворный диэлектрик МОП-структуры: с помощью ВФХ можно экстрагировать эквивалентную толщину подзатворного окисла в диапазоне от нескольких нм до сотен нм;

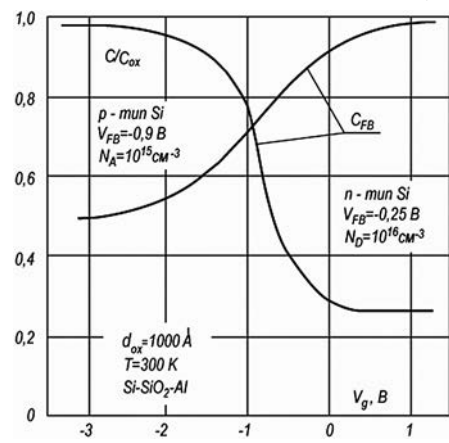


Рис. 7. Зависимость вида ВФХ МОП-конденсатора от типа легирующей примеси в подложке

- определение профиля легирования подложки МОП-структуры: профиль легирования может быть определен из ВФХ МОП-структуры в диапазоне концентраций примеси от 10^{14} cm^{-3} до 10^{18} cm^{-3} и глубиной легирования от 0,01 мкм до 10 мкм;
- P-N диод и диоды Шоттки: определение концентрации примеси в диапазоне от 10^{13} cm^{-3} до 10^{18} cm^{-3} .

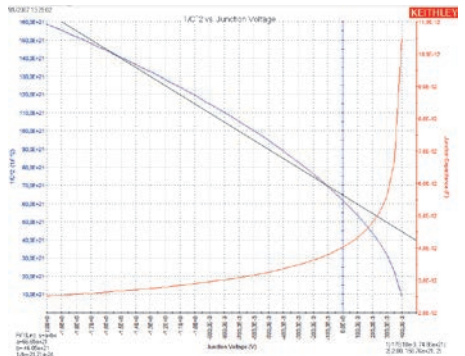


Рис. 8. Использование представления ВФХ п/диода в координатах $1/C^2$ vs V для экстракции концентрации примеси в подложке

Простейшим примером интерпретации измеренных ВФХ является определение типа легирующей примеси в подложке из вида высокочастотной ВФХ МОП конденсатора. На рис. 7 видно, что для разных типов легирующей примеси (N или P), емкость МОП-структуры приближается к максимуму (емкости окисла) при положительном или наоборот, отрицательном напряжении смещения, что позволяет по виду ВФХ сразу определить тип примеси в подложке.

Основой экстракции параметров является, конечно, эквивалентная электрофизическая модель тестовой структуры и ее математическое описание относительно простыми формулами.

Так, например, для измерений ВФХ полупроводникового диода, концентрация примеси связана с барьерной емкостью обратно-смещенного P-N-перехода довольно простым соотношением:

$$C = S \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 q N_A}{2(\phi_0 - U)}}$$

Таблица 4

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ LCR-АНАЛИЗАТОРОВ АКТАКОМ И KEYSIGHT TECHNOLOGIES

Параметр	LCR-анализаторы АКТАКОМ	LCR-анализаторы Keysight
Дисплей	7" TFT LCD, 800×480	3,5" TFT LCD, 320×240
Диапазон частот	20 Гц...300 кГц (АММ-3068) 20 Гц...500 кГц (АММ-3078) 20 Гц...1 МГц (АММ-3088)	20 Гц...300 кГц (E4980AL-032) 20 Гц...500 кГц (E4980AL-052) 20 Гц...1 МГц (E4980AL-102)
Разрешение по частоте	1 мГц	10 мГц
Разрядность	5 цифр	4 цифры
Уровень сигнала	5 мВ...10 Вскз, 50 мкА...100 мА	100 мкВскз...2 Вскз, 1 мкА...20 мА
Выходной импеданс	30 Ω / 50 Ω / 100 Ω	100 Ω
Контроль уровня сигнала	Да	Да
Базовая точность	0,05%	0,05%
Скорость измерения	9 / 67 / 187 мс	12 / 118 / 343 мс
Внутренний источник смещения DC	0 В...±10 В; 0 мА...±50 мА, 1 А (опция)	0 В...±40 В; 0 мА...±100 мА
Внешний источник смещения тока DC	макс. 120 А (опция)	не поддерживается
Список свипирования	частота, AC напряжение / ток, внутренний / внешний источник смещения 150 точек	частота, AC напряжение, 201 точка
Компаратор	Да	Да
Интерфейс	USB, LAN, RS-232C, GPIB (опция), LAN, Handler, Scanner	USB, LAN, GPIB, Handler (опция), Scanner (опция)
Графический анализ	Да Непрерывное сканирование и построение резонансных кривых с учетом AC уровня и DC смещения; отображение мин., макс. и резонансной частоты; сохранение во внутреннюю и внешнюю память	Нет

Из этого соотношения видно, что концентрация примеси прямо пропорциональна тангенсу угла наклона кривой, построенной как функция значений обратного квадрата измеренной емкости P-N перехода от приложенного напряжения смещения (рис. 8).

Измерив тангенс угла наклона синей кривой и, зная площадь P-N перехода и диэлектрическую постоянную полупроводника, можно вычислить концентрацию примеси в подложке диода.

Аналогично определяется концентрация примеси при снятии высокочастотной ВФХ МОП-конденсатора (рис. 9).

$$N_A = -\frac{2(2\phi_0 - kT/q)}{\epsilon_s \epsilon_0 q} \left(\frac{C_{ox} - 1}{C_{min} / C_{ox}} \right)^{-2}$$

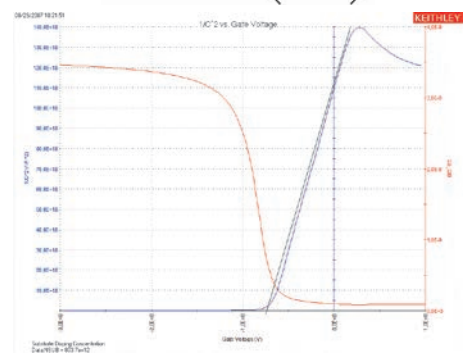


Рис. 9. Использование представления ВФХ МОП-конденсатора в координатах $1/C^2$ vs V для экстракции концентрации примеси в подложке

Поэтому, построение кривой $1/(C^2) = F(V)$ — типичный прием для экстракции параметров из ВФХ.

АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВФХ

В настоящее время на рынке специализированных C-V метров практически нет. Если раньше, в линейке продукции Keithley, было несколько C-V метров, например, CV-метр Keithley 595 (измеритель ВФХ квазистатическим методом), анализатор CV Keithley 590 (измеритель ВФХ на частотах 100 кГц / 1 МГц), а в линейке Agilent была модель 4279A (CV-метр на 1 МГц) и др., то в настоящее время, они уже давно сняты с производства. Функции CV-метрии остались, к примеру, как опция в многофункциональных параметрических тестерах полупроводников типа Keithley 4200A-SCS

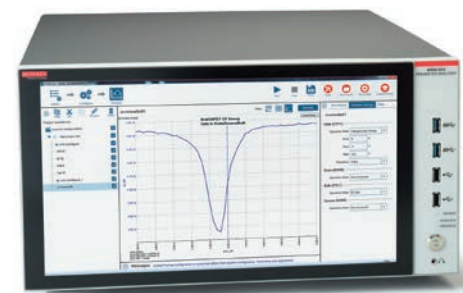


Рис. 10. Параметрический тестер полупроводников Keithley 4200A-SCS с опцией измерения ВФХ

(см. рис. 10 и табл. 3) или Keysight B1500A/B1505A.

Параметрические тестеры полупроводниковых приборов обеспечивают широкие диапазоны параметров анализа ВФХ, позволяющие тестировать широкий круг разнообразных полупроводниковых приборов и реализовать удобную экстракцию параметров полупроводников, однако, они имеют избыточный для целей измерения ВФХ функционал, существенно увеличивающий цену прибора. Высокая цена (несколько миллионов рублей) не позволяет использовать такие приборы для массовых целей — контроля качества технологических процессов на производственных участках и для лабораторных работ при обучении физике полупроводниковых приборов в ВУЗах.



Рис. 11. Передняя панель AMM-3078

Поэтому для таких бюджетных задач целесообразно рассмотреть возможности измерения ВФХ с помощью LCR-анализаторов АКТАКОМ, имеющих цену на порядок ниже параметрических тестеров и в два раза ниже аналогичных LCR-анализаторов Keysight Technologies, которые имеют близкие параметры (см. табл. 4).

LCR-анализаторы АКТАКОМ (см. табл. 5) представляют собой группу анализаторов импеданса, работающих по АС-методу по схеме моста с автобалансировкой и измеряющие полный



Рис. 12. Оснастка ACA-3026 (пробники Кельвина)



Рис. 13. Оснастка ACA-3048

Параметр	АММ-3068	АММ-3078	АММ-3088	АМ-3026
Ёмкость	0,00001 пФ...9,99999 Ф			0,0001 пФ...9,9999 Ф
Частота тестового генератора	20 Гц...300 кГц	20 Гц...500 кГц	20 Гц...1 МГц	20 Гц...5 МГц
Встроенный генератор смещения	-5 В...+5 В	-5 В...+5 В	-10 В...+10 В	-5 В...+5 В
Автоматическое построение графиков на экране	C(V), C(f), C(t)			Нет (только по точкам на внешнем ПК)
Интеграция с внешними устройствами для автоматизации измерений	Триггерный вход на запуск измерения, Handler, LAN, USB, RS-232, GPIB			
Дисплей	цветной графический ЖК 7" TFT, 800×480			монохромный текстовый 320×240

импеданс в широком диапазоне частот (до 5 МГц). Все приборы имеют встроенный генератор напряжения смещения (± 5 В или ± 10 В). Большая часть из них имеет функцию автоматического свипирования напряжения смещения, что позволяет не просто снимать ВФХ по точкам, а строить ее прямо на экране прибора.

с помощью LCR-анализатора АММ-3078. Он имеет встроенный генератор смещения от -5 В до $+5$ В и обеспечивает измерение полного импеданса в диапазоне частот от 20 Гц до 500 кГц, что вполне достаточно для проведения большинства типовых измерений ВФХ.

Подключим диод к прибору с помощью насадки АСА-3048. После включения прибора, выбираем пару одновременно выводимых на экран величин для измерения емкости: емкость в параллельном режиме C_p и проводимость G (рис. 14).

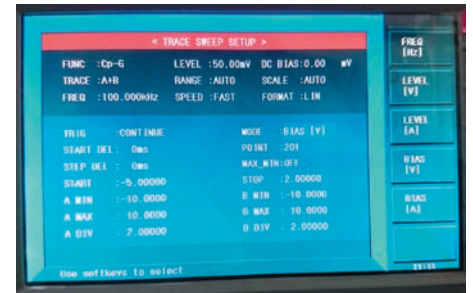


Рис. 15. Экран выбора режима свипирования LCR-анализатора АММ-3078

В окне установки режимов автоматической развертки (свипирования) выбираем режим свипирования по напряжению смещения в диапазоне от -5 В до $+2$ В, тестовое напряжение устанавливаем на уровне 50 мВ с частотой 100 кГц (рис. 15).

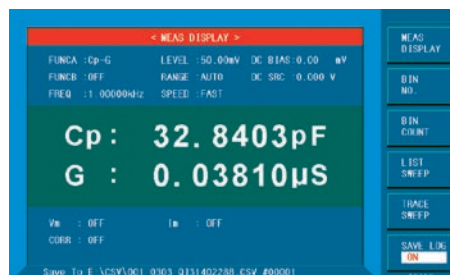


Рис. 14. Экран выбора режимов измерения LCR-анализатора АММ-3078

Пробниками Кельвина АСА-3026 (рис. 12) можно подключаться к габаритным приборам, имеющим выводы нестандартного размера, а также приборам, вмонтированным в печатные платы и в корпусах.

Насадка АСА-3048 предназначена для подключения к LCR-анализаторам приборов, имеющих достаточно длинные выводы (диоды, конденсаторы, мощные сопротивления).

Теперь, проведем измерение ВФХ обычного полупроводникового диода

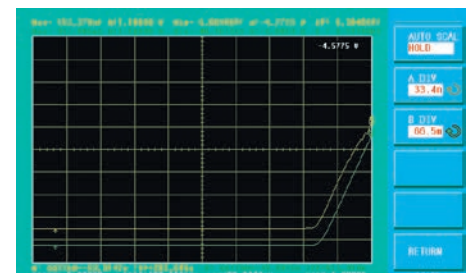


Рис. 16. Результат измерения ВФХ полупроводникового диода LCR-анализатором АММ-3078

После запуска режима свипирования наблюдаем на экране (рис. 16) зависимость двух величин C_p (помечена на экране желтым цветом и буквой А) и G (помечено зеленым и буквой В) от приложенного напряжения смещения.

Значения емкости, проводимости и приложенного напряжения смещения

для каждой точки графика можно определить, включив режим курсора, который можно передвигать по экрану в произвольное место (рис. 17) и получать Ср и G для каждого значения приложенного напряжения в верхней правой части экрана.

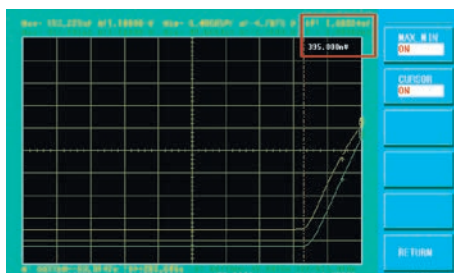


Рис. 17. Использование курсоров в режиме свипирования в LCR-анализаторе АММ-3078

Для проведения измерений на АММ-3078 можно установить разную скорость свипирования, т.е. разный временной интервал между каждой точкой измерения, или даже задать дополнительную временную задержку между каждой точкой графика. Довольно часто в измерениях ВФХ нужно устанавливать медленную скорость свипирования, чтобы проводить измерения в уже установившемся состоянии, т.е. когда перераспределение носителей, формирующих объемный заряд в полупроводнике, уже завер-

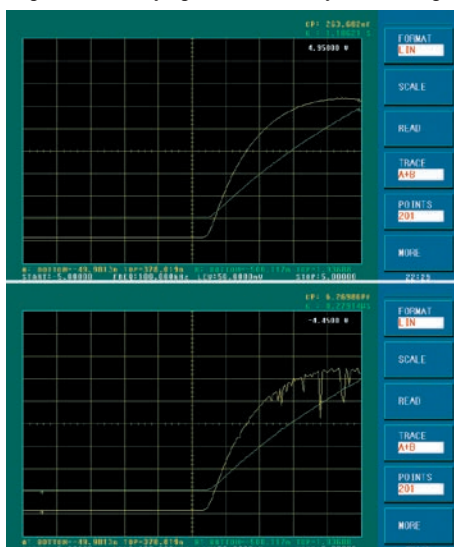


Рис. 18. ВФХ диода при разных скоростях измерения LCR-анализатором АММ-3078: сверху — низкая скорость измерения, снизу — высокая (появляются неравновесные искажения)

шилось. В противном случае, измерения происходят в неравновесном состоянии полупроводника, что дает некорректные результаты: На рис. 18 приведены результаты измерения ВФХ диода в диапазоне напряжений смещения от -5 В до +5 В, проведенные с разной скоростью. При высокой скорости измерения возникают заметные ошибки в правой части графика, вызванные измерениями в неравновесном состоянии, которые

A	
1	Ср-G , 3.28403e-11, 3.80995e-08, 0
2	DATE, 2017-03-03, 16:54:45
3	POINTS, BIAS [V], Ср, G
4	1, -5.00000 , 14.2124p, 12.4991u
5	2, -4.96500 , 14.1169p, 11.2466u
6	3, -4.93000 , 14.7184p, 11.7410u
7	4, -4.89500 , 14.4150p, 11.5077u
8	5, -4.86000 , 14.4519p, 12.6210u
9	6, -4.82500 , 14.4689p, 11.9666u
10	7, -4.79000 , 14.5260p, 11.0272u
11	8, -4.75500 , 14.4887p, 11.7844u
12	9, -4.72000 , 14.6486p, 12.4063u
13	10, -4.68500 , 14.6453p, 11.4759u
14	11, -4.65000 , 14.6167p, 12.8014u
15	12, -4.61500 , 14.5484p, 12.3365u
16	13, -4.58000 , 14.9006p, 12.4208u
17	14, -4.54500 , 14.6448p, 12.4964u
18	15, -4.51000 , 14.5742p, 12.2790u
19	16, -4.47500 , 14.6124p, 11.5273u
20	17, -4.44000 , 14.9685p, 12.4108u
21	18, -4.40500 , 14.8320p, 11.7896u
22	19, -4.37000 , 14.9253p, 11.7137u
23	20, -4.33500 , 14.8742p, 11.6391u
24	21, -4.30000 , 14.7033p, 12.2574u
25	22, -4.26500 , 14.7944p, 12.3093u
26	23, -4.23000 , 14.8204p, 12.8114u
27	24, -4.19500 , 14.8270p, 11.6419u
28	25, -4.16000 , 14.9191p, 11.3500u
29	26, -4.12500 , 15.1436p, 12.2186u

Рис. 19. Выгрузка числовых данных ВФХ в электронную таблицу в формате CSV

не появляются при низкой скорости измерения.

Чтобы получить протокол измерения, можно сохранить копию экрана на внешний носитель (флэшку), и в формате CSV (данных с разделительной запятой), которые можно обработать в математическом редакторе или редакторе электронных таблиц (рис. 19).

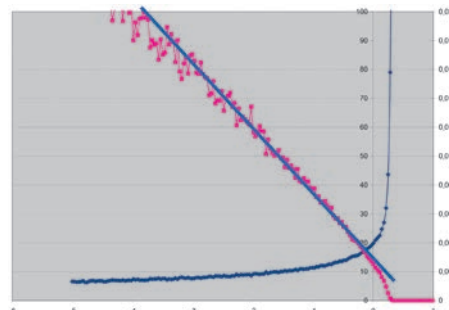


Рис. 20. Построение экспериментальной ВФХ полупроводникового диода в координатах $1/C^2$ vs V (красным цветом)

Экстракция данных из построенной ВФХ диода может быть осуществлена путем обработки таблицы в математическом редакторе таблиц типа Excel (в нашем случае, построением функции $C_p = f(1/V^2)$) (рис. 20) с

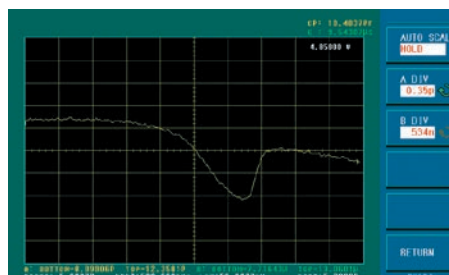


Рис. 21. ВФХ МОП-транзистора 2P301B с изолированным затвором и индуцированным каналом, измеренная на АММ-3078

дальнейшим построением линии тренда для участка, соответствующего обратному смещению P-N перехода диода (см. выше).

Аналогично можно измерить и ВФХ МОП-транзистора с изолированным затвором. Результат построения такой ВФХ для транзистора 2P301B приведен на рис. 21.

Таким образом, как было показано выше, анализаторы LCR АКТАКОМ вполне подходят для измерения ВФХ полупроводниковых приборов в условиях ограниченного бюджета.

Аппаратные ограничения LCR-анализаторов АКТАКОМ по диапазону смещения (от -5 В до +5 В или от -10 В до +10 В), а также в частоте тестового сигнала (от 20 Гц, до 5 МГц) тем не менее позволяют тестировать широкий круг полупроводниковых структур и делают эти приборы интересными для широкого круга инженеров, научных сотрудников и преподавателей высшей школы.

ЛИТЕРАТУРА

- Абрамов В.Б., Карпанин О.В., Медведев С.П., Метальников А.М., Печерская Р.М. Исследование вольт-фарядных характеристик. //Методические указания по выполнению лабораторной работы. — ПГУ, каф. НиМЭ, Пенза, 2009.
- Lee Stauffer «Fundamentals of Semiconductor C-V Measurements», Keithley Instruments, Inc.
- «C-V Testing for Components and Semiconductor Devices», applications guide, Keithley Instruments, Inc.
- «Impedance Measurement Handbook — A guide to measurement technology and techniques, 6th Edition — Application Note» Keysight Technologies.
- «Evaluation of MOS Capacitor Oxide C-V Characteristics Using the Agilent 4294A», Agilent Application Note 4294-3.
- Гуртов В.А., Артамонов О.Н., Ветров А.С. «Учебное пособие по твердотельной электронике: гл. 3.6 Вольт-фарядные характеристики структур МДП», Кафедра физики твердого тела Петрозаводского государственного университета (dssp.petrsu.ru/book/chapter3/part6.shtml).

Semiconductor electrophysics of today can hardly be imagined without C-V characteristic measurement meaning the capacitance measurement as a function of the applied direct offset voltage. This very measurement allows quickly identifying the basic parameters of semiconductor and dielectric layers which direct measurement is considered a rather complicated process. You will find more details in the present article and also get to know about the use of АКТАКОМ LCR analyzers for semiconductor C-V measurement.