

# МНОГОТОЧЕЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В АНАЛИЗАТОРАХ КОМПОНЕНТОВ АКТАКОМ СЕРИИ АММ-30x8

## MULTIPOINT MEASUREMENT MODE IN АКТАКОМ АММ-30x8 COMPONENT ANALYZER SERIES

Для решения различных научных и практических задач в области радиоэлектроники и полупроводниковой техники постоянно возникает необходимость измерений и качественной оценки состояния различных электронных компонентов, не только пассивных — измерение резистивности (сопротивления), емкости конденсаторов и индуктивности различных катушек или обмоток, но и полупроводниковых структур. Подобные измерения необходимы не только для оценки качества (некоторые элементы, например бумажные или электролитические конденсаторы, значительно изменяют свои характеристики с течением времени), но и в ряде работ, где требуется точная подгонка и настройка компонентов (например, для установки частоты резонанса контуров и фильтров), при определении характеристик (например, температурных зависимостей), отбраковке «годен-негоден» при допусковом контроле на производстве или в научно-исследовательской деятельности.

### НЕМНОГО ТЕОРИИ

Не будем углубляться в ТОЭ — теоретические основы электротехники, но напомним, что сопротивление таких элементов, как индуктивности и конденсаторы в цепи переменного тока, сильно зависит от частоты протекающего тока и характеризуются комплексным сопротивлением или, по-другому, импедансом. Для измерения комплексных параметров цепей или импеданса на различных частотах используются, так называемые, измерители импеданса. В большинстве случаев современные приборы позволяют также измерять и ком-



плексную проводимость — амитанс, и тогда прибор называется измерителем иммитанса (анализатором компонентов или измерителем RLC).

Комплексное сопротивление (обычно обозначается буквой  $Z$ ) выражается суммой активной ( $R$ ) и реактивной ( $X$ ) составляющих — частотнозависимых индуктивной  $X_L$  и емкостной  $X_C$ , т.е.  $Z=R+j(X_L-X_C)$ , а полное сопротивление участка цепи есть модуль комплексного сопротивления  $Z=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}$ .

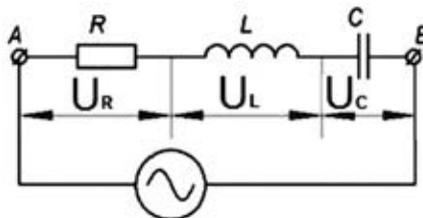


Рис. 1. Представление участка цепи в сети переменного тока

Каждый конденсатор имеет свое внутреннее конечное сопротивление диэлектрика между пластинами, которое приводит к возникновению внутренних утечек. Это сопротивление зависит от частоты, и чем меньше сопротивление, тем лучше емкость. Аналогичные потери присущи и индуктивностям — активное сопротивление провода, магнитное поле рассеивания, вихревые токи и другие параметры снижают качество компонента. Для оценки внутренних потерь в емкостях и индуктивностях

ввели понятия добротности  $D$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $Q$ , при этом величины связаны зависимостью  $D=1/Q$ . Обычно, потери в емкости оценивают по тангенсу угла диэлектрических потерь, а потери в индуктивности — по добротности.

Для корректного проведения измерений необходимо выбрать и правильную эквивалентную схему — последовательную (обозначена подстрочным индексом «s») или параллельную (индекс «p»). Выбор эквивалентной схемы зависит от частоты сигнала и учитывает, какое реактивное сопротивление имеет большее влияние на этой частоте. Как правило, при больших значениях индуктивности и емкости выбирают параллельную схему, а при малых — последовательную.



Рис. 2. Экран прибора АММ-3038 в режиме измерения емкости при параллельной схеме замещения  $C_p$  и добротности  $D$

Метод измерения и расчета результатов измерения, используемый в приборах, позволяет определять сразу пару параметров, например емкость и тангенс угла диэлектрических потерь  $Q$  или емкость и добротность  $D$  (рис. 2).

### АНАЛИЗАТОРЫ КОМПОНЕНТОВ АКТАКОМ

Для определения характеристик радиоэлектронных приборов и материалов используются специализированные приборы — источники-измерители, выполняющие функции источника напряжения с измерением тока и источника тока с измерением напряжения (рис. 3), что позволяет построить вольт-амперную характеристику исследуемого прибора.

Однако, при исследовании полупроводниковых структур и специфики проводимости полупроводников этого бывает недостаточно и требуются дополнительные исследования, в частности, построение вольт-фарадных характеристик. Для таких измерений используются более сложные приборы — параметрические анализаторы или характериографы (рис. 4), позволяющие исследовать изменение характеристик тестируемых элементов в зависимости от изменений частоты и амплитуды тестового сигнала и отображающие результат изме-

Широко применяемые при исследованиях электронных устройств вольт-амперные характеристики (ВАХ) описывают зависимость тока перехода  $I$  в зависимости от приложенного напряжения  $U$ . Однако это справедливо при медленно изменяющемся напряжении  $U$ , а в случае, когда скорость изменения напряжения соизмерима с временем накопления и рассасывания неравновесного носителя заряда, применение ВАХ становится невозможным. Такой режим называется динамическим, в этом случае р-п переход является инерционным элементом по отношению к быстрым изменениям тока или напряжения, т.к. новое распределение носителей заряда устанавливается не сразу, что связано с изменением физических свойств перехода при приложении внешнего напряжения. Можно считать, что р-п переход обладает емкостью, подключенной параллельно переходу и условно состоящую из двух составляющих — барьерной и диффузной емкостей. Не вдаваясь глубоко в физику процессов, отметим, что с увеличением обратного напряжения барьерная ёмкость уменьшается, а с увеличением прямого напряжения — увеличивается. Диффузная емкость пропорциональна значению тока через переход и зависит от частоты — с увеличением частоты тока значение емкости убывает, стремясь к «0». Зависимость емкости перехода от напряжения называется вольт-фарадной характеристикой (ВФХ). Построение вольт-фарадных характеристик — один из основных способов оценки качества полупроводниковых структур, а анализ ВФХ позволяет быстро определить базовые характеристики полупроводниковых структур, недоступные к определению другими прямыми методами.

рения на экране в виде кривой (или семейства кривых). Как правило, это дорогие специализированные приборы используемые для точного измерения одной-двух задач (например СВ-метрии — построении ВФХ), но в большинстве случаев для проведения измерений можно использовать более универсальные и доступные приборы-анализаторы компонентов (измерители иммитанса), которые способны проводить значительно более широкие измерения, включая измерения емкости и индуктивности компонентов на разных частотах и при разных напряжениях и токах смещения.



Рис. 3. Источник измеритель Keithley 2460



Рис. 4. Параметрический анализатор (характериограф) Keithley 4200A-SCS

В ряду контрольно-измерительных приборов торговой марки АКТАКОМ есть разнообразные анализаторы компонентов, как переносные, в ручном исполнении, так и настольные приборы. Конечно, настольные приборы обладают значительно более широкими возможностями, в первую очередь, в разнообразии возможных установок тестового сигнала — можно изменить амплитуду, частоту, значение постоянного смещения по напряжению или по току и некоторые другие параметры. В стационарных моделях доступен режим свипирования с постоянным или произвольно устанавливаемым шагом, который позволяет проводить автоматические измерения не только в заданном диапазоне, но и детализировать измерения в отдельных областях диапазона, а с учетом встроенной функции компаратора прибор может использоваться в составе автоматизированных линий.

Изменение амплитуды тестового сигнала (например, с шагом 0,1 мВ в диапазоне 5...999 мВ или 10 мВ в диапазоне 1...10 В у АММ-3068) позволяют построить практически непрерывную сетку уровней в широком диапазоне амплитуд. Такой режим необходим для измерения значений компонентов, реактивные значения которых зависят от уровня сигнала.

Частота тестового сигнала в большинстве измерений компонентов играет определяющую роль, т.к. именно точный подбор частоты тестового сигнала позво-



Рис. 5. Анализаторы компонентов АКТАКОМ АММ-3035, АМ-3125, АМ-3026, АММ-3048, АММ-3088

лит определить уровень потерь, вносимых компонентом на рабочей частоте при дальнейшем использовании.

Применение постоянного напряжения смещения существенно при тестировании полупроводниковых структур или различного вида емкостей конденсаторов, например при тестировании полярных электролитических конденсаторов, варикапов или трансформаторов, параметры которых зависят от степени намагничивания постоянным током и насыщения сердечника.

Режим автоматического многоточечного изменения параметров тестового сигнала или режим свипирования позволяет провести измерение по заранее созданной последовательности значений (списку, LIST SWEEP) или в заданном диапазоне (TRACE SWEEP). Шаг устанавливаемых значений может быть как произвольным, так и автоматически установленным в указанных границах, распределение значений может быть линейным или логарифмическим. Подобные тесты позволяют комплексно оценить зависимость исследуемого параметра от изменения тестового сигнала во всем рабочем диапазоне.

Измерители иммитанса АКТАКОМ серии АММ-30х8 — представители «умных» измерителей импеданса, работающих с использованием АС-метода по схеме моста с автобалансировкой и измеряющих импеданс в широком диапазоне частот 20 Гц...1 МГц. В серии выделяются две

Таблица

Параметр	АММ-3038/3048/3058	АММ-3068/3088
Тестовая частота	20 Гц...300 кГц (у АММ-3038/3068) 20 Гц...500 кГц (у АММ-3048) 20 Гц...1 МГц (у АММ-3058/3088)	
Наилучшее разрешение	0,5 мГц	
Напряжение тестового сигнала	5 мВ...5 Вскз	5 мВ...10 Вскз
Наилучшее разрешение	100 мкВ	
Ток тестового сигнала	5 мкА...20 мкА	
Наилучшее разрешение	1 мкА	
Постоянное смещение	0...±10 В у АММ-3088 0...±5 В / 0...±100 мА у АММ-3038/3048/3058/3068	
Диапазон измерений		
Z , X, R, DCR	0,00001 Ом...99,9999 МОм	
Y , B, G	0,00001 мкСм...99,9999 См	
C	0,00001 пФ...9,99999 Ф	
L	0,00001 мкГн...99,9999 кГн	
D	0,00001...9,99999	
Q	0,00001...99999,9	
θ (град)	-179,999°...179,999°	
θ (рад)	-3,14159...3,14159	
Схема замещения	параллельная, последовательная	

группы приборов, отличающихся только частотой и амплитудой тестового сигнала.

Все приборы в серии имеют встроенный генератор напряжения смещения (0...±5 В или 0...±10 В у АММ-3088), а также генератор тока смещения в диапазоне от 0 до ±100 мА, что, например, может быть востребовано при тестировании транзисторных структур.

В режиме работы по списку LIST SWEEP возможно динамическое изменение параметров тестового сигнала — уровня и частоты тестового сигнала, а также величины смещения постоянного тока.

В старших приборах серии — АММ-3068 и АММ-3088 есть также режим TRACE SWEEP, но о нем чуть позже.

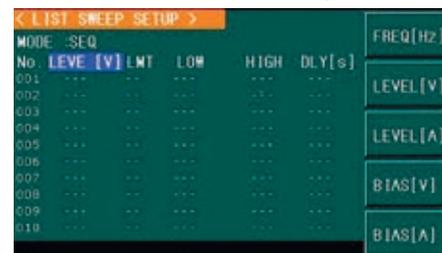


Рис. 6. Меню установки параметров режима свипирования в приборах АММ-3038/3048/3058

Какие же возможности открываются при использовании режима LIST SWEEP? Как видно из рисунка (рис. 6), прибор позволяет создать список, включающий до 200 значений изменения характеристики тестового сигнала — частоты, уровня или смещения. При установке уровня сигнала или смещения можно выбрать как установку значения напряжения, так и тока. Но, что более важно, при установке постоянного смещения можно использовать отрицательные значения от -5 В до +5 В (или от -10 В до +10 В для прибора АММ-3088), что позволяет оценивать полупроводниковые структуры и компоненты путем снятия вольт-фарадных характеристик, т.е. изменение емкости полупроводниковой структуры в зависимости от приложенного напряжения.

Ввод значений может осуществляться как пошагово, когда в каждой строке прописывается необходимое значение параметра, так и с автоматическим заполнением, указав начальное и конечное значения и используя кнопки FILL LINEAR и FILL LOG, можно заполнить все промежуточные значения по линейному или логарифмическому законам. Это особенно удобно в тестах, содержащих большое количество шагов и требующих равномерного или логарифмического распределения значений в указанном диапазоне. Дополнительно можно установить и параметры сканирования — пошаговый или последовательный режим сканирования и задержку перед

переходом к следующему шагу. В случае, если выбран пошаговый режим свипирования STEP и установлен ручной запуск, переход к следующему шагу будет осуществляться только после нажатия клавиши запуска TRIGGER, а в случае установки последовательного режима SEQ тест будет продолжаться постоянно. Так же, можно установить задержку после выполнения каждого шага, это поможет исключить влияние переходных процессов, улучшить наглядность результатов теста и т.д.

В комплекте поставки приборов имеется специализированная оснастка для подключения различных объектов, как отдельных компонентов, так и установленных на печатных платах (рис. 7).

Протестируем полупроводниковый диод в режиме LIST SWEEP прибором АММ-3038. Для этого выбираем пару измеряемых параметров — емкость в режиме параллельного подключения  $C_p$  и проводимость  $G$  и устанавливаем параметры тестового сигнала — свипирование по напряжению смещения от -2 В до +2 В с частотой 100 кГц. После нажатия FILL LINEAR прибор автоматически пошагово установил значения напряжения смещения от 1 до 10 шага (рис. 8) и после включения смещения клавишей DC BIAS измерил и заполнил таблицу значений. Отметим, что при необходимости построения более подробного графика можно задать до 200 шагов нажимая клавишу NEXT PAGE и переходя на следующие страницы.

Аналогично, для проведения других измерений можно использовать и свипирование по другим параметрам, например, исследуя зависимость емкости конденсатора от частоты, можно изменять частоту тестового сигнала (рис. 9).

В старших приборах серии — АММ-3068 и АММ-3088 — дополнительно к описанному выше режиму LIST SWEEP доступен режим TRACE SWEEP (рис. 10). Приборы оснащены функцией анализа



Рис. 7. Оснастка анализаторов компонентов АММ-3038/3048/3058/3068/3088. Вверху — 4-проводные щупы Кельвина для измерений установленных компонентов и крупногабаритных элементов, внизу — 4-проводный зажим для тестирования выводных компонентов

No.	BIAS [V]	$C_p$ [F]	$G$ [S]	CMP
001	-2.0000	615.862n	165.962n	P
002	-1.5556	105.055n	51.5131n	P
003	-1.1111	28.6641n	20.5149n	P
004	-666.07n	15.0232n	9.46306n	P
005	-222.22n	9.76945n	4.35103n	P
006	222.22n	2.31551n	1.62517n	P
007	666.67n	1.06058n	276.341u	P
008	1.1111	14.9940p	0.18266u	P
009	1.5556	8.8985Sp	0.00444u	P
010	2.0000	10.1259p	-0.00222u	P

Рис. 8. Измерение емкости перехода полупроводникового диода при изменении смещения от -2 В до +2 В

АЧХ и в режиме TRACE SWEEP прибор производит автоматические измерения с заданными параметрами и строит график с числом точек кривой 101, 201, 401 и 801 с выбором линейной или логарифмической шкалы. Для свипирования доступны такие же функции как и в режиме LIST SWEEP — частота и уровень тестового сигнала, а также величина постоянного смещения.

No.	FREQ[Hz]	$C_p$ [F]	$G$ [S]	CMP
001	100.000	92.7222u	7.59345	P
002	11.2000k	7.64230u	0.36676	P
003	22.3000k	2.53467u	0.21109	P
004	33.4000k	1.18823u	0.14108	P
005	44.5000k	605.930n	0.09279	P
006	55.6000k	277.935n	0.05192	P
007	66.7000k	68.5192n	0.01510	P
008	77.8000k	80.4329n	0.02041	P
009	88.9000k	-189.971n	0.05402	P
010	100.000k	275.083n	0.08054	P

Рис. 9. Измерение емкости конденсатора при изменении частоты тестового сигнала от 100 Гц до 100 кГц



Рис. 10. Кнопка включения режима TRACE SWEEP на экране меню измерений прибора АММ-3088

Посмотрим, как работает режим TRACE SWEEP на таком же примере, как и для режима LIST SWEEP прибора АММ-3038. Для этого возьмем аналогичный диод, и установим такие же параметры — строим зависимость емкости перехода в параллельном режиме включения  $C_p$  и проводимость  $G$ , и изменяем напряжение смещения при частоте сигнала 100 кГц. В отличие от предыдущего теста, для лучшей визуализации графика, незначительно изменили диапазон смещения, установили от -1 В до +3 В. Количество снимаемых точек установлено по умолчанию — 201, при увеличении числа измерений увеличивается время теста. Результат — график зависимости  $C_p$  и  $G$  представлен на рис. 11.

Режим TRACE SWEEP, как и другие измерительные режимы прибора, имеет много дополнительных функций, повышающих точность и удобство измерений — изменяемая скорость свипирования, возможность установки задержки между точками измерения для исключения влияния

переходных процессов, курсор, при движении которого по графику отображаются значения всех переменных в этой точке и другие функции.

Результаты измерений можно сохранить. В младших приборах серии сохраняется файл состояния \*.sta, который может быть позднее загружен в прибор и отображен на экране. В приборах АММ-3068 и АММ-3088 помимо файла состояния результат тестирования можно сохранить в файлах типа \*.csv (на внешнем запоминающем устройстве), чтобы в дальнейшем обрабатывать программными средствами, например Microsoft Excel (рис. 12).



Рис. 11. Примерный график зависимости емкости перехода полупроводникового диода от изменения постоянного смещения в режиме TRACE SWEEP прибора АММ-3088

	A	B	C	D
1	DATE	2020-01-14	13:27:31	
2	POINTS, BIAS [V], $C_p$ , $G$			
3	1	-1.00000	10.8988p	0.71791u
4	2	-980.000m	10.9375p	0.72930u
5	3	-960.000m	10.9831p	0.72769u
6	4	-940.000m	11.0359p	0.72897u
7	5	-920.000m	11.1057p	0.73253u
8	6	-900.000m	11.1246p	0.73768u
9	7	-880.000m	11.1650p	0.74899u
10	8	-850.000m	11.1881p	0.75620u
11	9	-840.000m	11.2257p	0.81902u
12	10	-820.000m	11.3133p	0.83966u
13	11	-800.000m	11.3906p	0.86065u
14	12	-780.000m	11.4472p	0.86002u
15	13	-760.000m	11.4634p	0.85713u
16	14	-740.000m	11.5579p	0.88663u
17	15	-720.000m	11.6434p	0.89376u
18	16	-700.000m	11.7153p	0.89348u
19	17	-680.000m	11.7923p	0.90496u
20	18	-660.000m	11.8768p	0.91316u
21	19	-640.000m	11.9379p	0.92306u

Рис. 12. Вид фрагмента сохраненного в \*.csv файле результата измерения, приведенного на рис. 11

Подводя итог, можно сказать, что анализаторы компонентов АКТАКОМ серии АММ-30х8, благодаря возможности изменения параметров тестового сигнала, встроенному генератору напряжения и тока смещения, встроенному компаратору, режиму многоточечных измерений (работы по списку), а старшие модели серии — дополнительно функции сканирования и графического анализа, возможности документирования и сохранения результатов измерений, являются одними из самых востребованных приборов в современной радиолaborатории.

*The current article describes the application of the multipoint measurement mode (automatic range or step sweeping) in AKTAKOM AMM-30x8 component analyzer series which expands the capabilities of the device, including semiconductor structures analysis, increases the results reliability and reduces the time it takes for measurements.*