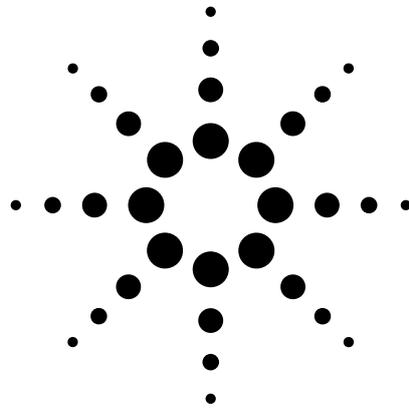
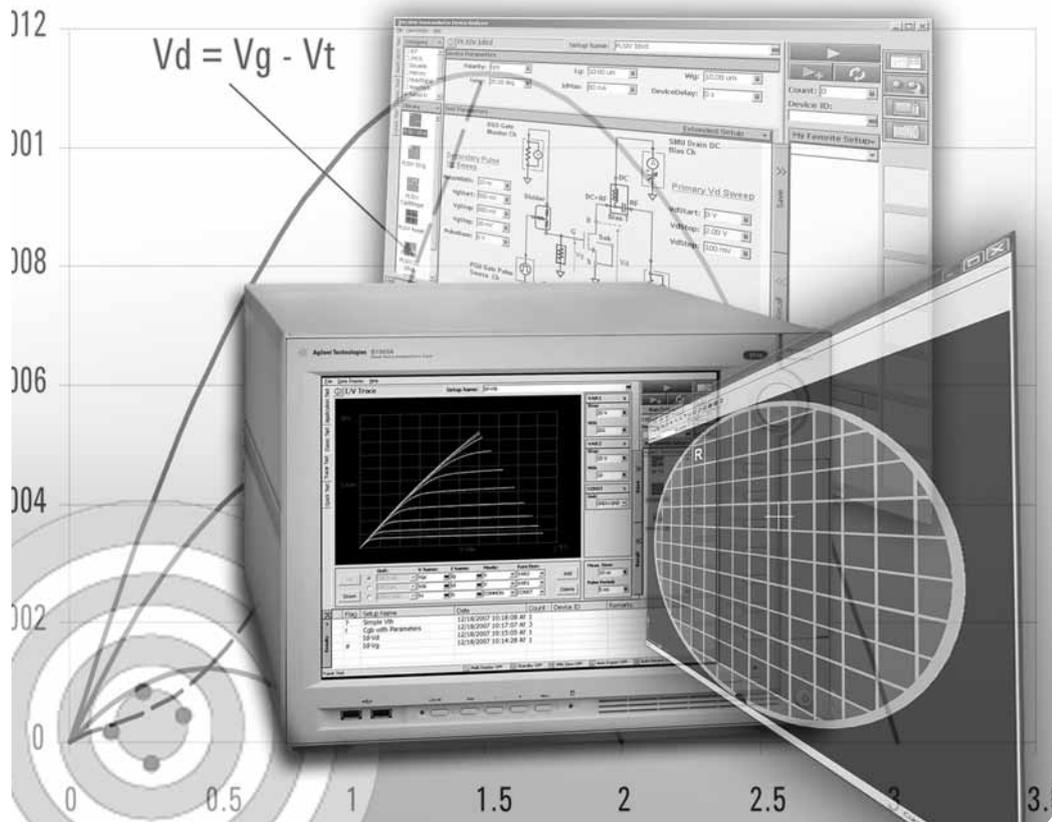


# Справочник по параметрическим измерениям



*Третье издание  
Март 2012 г.*



**Agilent Technologies**

# Содержание

Предисловие.....	4
Глава 1. Основы параметрического тестирования.....	5
Что такое параметрический тест? .....	5
Зачем выполняются параметрические тесты?.....	6
Где выполняются параметрические тесты? .....	8
История инструментария параметрического тестирования .....	10
1980-е годы.....	10
1990-е годы.....	10
2000-е годы.....	11
Глава 2. Основы параметрических измерений .....	13
Терминология измерений.....	13
Точность и воспроизводимость .....	13
Разрешающая способность .....	14
Прослеживаемость измерений.....	15
Guard- и Shield-экранирование.....	16
Shield-экранирование - способ обеспечить минимальный уровень собственных шумов .....	16
Предотвращение образования паразитных контуров с замыканием через землю .....	18
Guard-экранирование: минимизация токов утечки при измерении слабых токов .....	19
Соединение триаксиального кабеля и коаксиального кабеля с разъемом BNC .....	21
Четырехпроводная схема измерения (метод Кельвина).....	23
Триаксиальные кабели Кельвина .....	25
Шумы при электрических измерениях .....	26
Дробовой шум .....	26
Тепловой шум .....	27
Фликкер-шум или шум $1/f$ .....	27
Шум линии электропитания.....	27
Глава 3. Основы построения модуля «источник/измеритель» (SMU).....	28
Обзор SMU.....	28
Введение.....	28
Режимы работы и настройки SMU.....	31
Выходы источника и измерителя SMU .....	32
Описание работы модуля заземления .....	34
Подсоединение сильноточных SMU (B1505A) .....	37
Выбор диапазона измерений .....	38
Основы выбора диапазона измерений.....	38
Управление диапазоном измерений.....	40
Устранение шумов измерения и переходных процессов сигнала.....	44
Время интегрирования .....	44
Время удержания и время задержки .....	45
Измерения слабых токов .....	46
Устранение смещения нуля .....	46
Отладка процесса измерения слабых токов.....	48
Точечные и свипирующие измерения .....	49
Сравнение точечных и свипирующих измерений.....	49
Первичные свипирующие измерения.....	49
Импульсные свипирующие измерения.....	50
Измерения с зависимым свипированием .....	51
Измерения с синхронным свипированием .....	52
Измерения с многоканальным свипированием .....	54
Измерения со свипированием по списку .....	55

## Содержание (продолжение)

Параллельное и последовательное соединение SMU.....	56
<i>Последовательное соединение SMU</i> .....	56
<i>Параллельное соединение SMU</i> .....	57
Вопросы безопасности.....	59
<i>Блокировка</i> .....	59
Селектор модулей (B1505A).....	61
<i>Обзор</i> .....	61

# Содержание

Глава 4. Параметрические измерения на полупроводниковой пластине .....	64
Введение .....	64
<i>Сравнение полностью автоматизированных и исследовательских зондовых станций</i> .....	64
Сложности измерений с помощью зондовой станции .....	65
<i>Экранирование держателя пластин</i> .....	65
<i>Сложности измерений при низких и высоких температурах</i> .....	66
<i>Зондовые станции для измерений по постоянному току и в ВЧ диапазоне</i> .....	70
Матричные коммутаторы .....	72
<i>Введение</i> .....	72
<i>Проб-карты и тестовый модуль</i> .....	73
Коммутация при использовании позиционеров .....	76
<i>Введение</i> .....	76
<i>Модуль коммутации с атто-чувствительностью</i> .....	76
<i>Унифицированный модуль SMU CMU</i> .....	77
<i>Объединение цепей Guard-экрана на время измерений</i> .....	79
<i>Решения Agilent Technologies по коммутации измерений при использовании позиционеров</i> .....	82
Высоковольтные и сильноточные измерения на пластине .....	83
<i>Обзор</i> .....	83
<i>Как подключать?</i> .....	83
Глава 5. Времязависимые и высокоскоростные измерения .....	89
Введение .....	89
Параллельные измерения с использованием SMU .....	89
Временная выборка с использованием SMU .....	91
<i>Сравнение последовательного и синхронного включения SMU</i> .....	92
<i>Настройка интервала временной выборки</i> .....	92
<i>Расширенные функции временной выборки (B1500A/B1505A)</i> .....	93
Поддержание постоянного шага свипирования .....	97
Разработка структур для высокоскоростных испытаний .....	99
Быстрые измерения обычных и импульсных ВАХ .....	103
<i>Обзор</i> .....	103
<i>Высоковольтный полупроводниковый генератор импульсов (HV-SPGU)</i> .....	104
<i>Генератор сигналов/быстродействующий измеритель (WGFMU)</i> .....	106
<i>Решение для измерения ВАХ с помощью импульсов длительностью 10 нс</i> .....	112
<i>Решения Agilent Technologies для импульсных измерений ВАХ</i> .....	117
<i>Выводы</i> .....	117
Глава 6. Точное измерение сопротивления .....	118
Основы измерения сопротивления .....	118
Удельное сопротивление .....	119
Тестовые структуры Ван дер Пау .....	120
Учет воздействия самонагрева, вызванного эффектом Джоуля .....	121
Устранение воздействия электродвижущей силы (ЭДС) .....	123
<i>Что такое ЭДС?</i> .....	123
<i>Устранение вредного воздействия ЭДС</i> .....	124
Глава 7. Измерение характеристик диодов и транзисторов .....	126
Введение .....	126
Диоды и р-п переходы .....	126
<i>Работа р-п диодов</i> .....	126
<i>Основные характеристики диода</i> .....	131
Измерение характеристик МОП-транзисторов .....	132

## Содержание (продолжение)

<i>Принцип работы МОП-транзисторов (MOSFET) .....</i>	132
<i>Основные характеристики МОП-транзисторов .....</i>	136
Измерение параметров биполярных транзисторов .....	139
<i>Принцип работы биполярного транзистора .....</i>	139
<i>Основные характеристики биполярного транзистора.....</i>	141

# Содержание

Глава 8. Основы измерения емкости.....	145
Введение.....	145
Измерение емкости МОП-транзисторов.....	146
<i>Обзор поведения емкости МОП-транзисторов.....</i>	<i>146</i>
<i>Пример расчетов параметров МОП-транзистора.....</i>	<i>147</i>
Квазистатическое измерение емкости.....	151
<i>Получение зависимости QSCV.....</i>	<i>151</i>
<i>Метод измерений QSCV с помощью линейно нарастающего напряжения.....</i>	<i>152</i>
<i>Метод измерения QSCV с помощью ступенчатого напряжения.....</i>	<i>153</i>
<i>Компенсация смещения при измерениях QSCV.....</i>	<i>155</i>
Низкочастотное (< 5 МГц) измерение емкости.....	156
<i>Принцип работы измерителя емкости.....</i>	<i>156</i>
<i>Метод измерений 4TP.....</i>	<i>157</i>
<i>Важность правильной компенсации.....</i>	<i>158</i>
<i>Измерение емкости на пластине.....</i>	<i>160</i>
Высокочастотные (> 5 МГц) измерения емкости.....	163
<i>Проблемы, связанные с тонким слоем подзатворного диэлектрика.....</i>	<i>163</i>
<i>Оптимизация результатов измерений ВФХ за счет правильного проектирования тестовой структуры.....</i>	<i>168</i>
<i>Рассмотрение топологии контактных площадок.....</i>	<i>169</i>
<i>Использование калибровочных мер XX/КЗ/Согласованная нагрузка.....</i>	<i>170</i>
<i>Расчет параметров трехэлементной модели конденсатора.....</i>	<i>171</i>
<i>Усовершенствованный метод измерения ВАХ.....</i>	<i>173</i>
<i>Управление анализатором 4294А с помощью ПО EasyEXPERT.....</i>	<i>176</i>
<i>Практические рекомендации по измерению емкости тонких диэлектриков затвора.....</i>	<i>178</i>
Измерения емкости с помощью матричного коммутатора.....	179
<i>Проблемы измерения емкости с использованием матричных коммутаторов.....</i>	<i>179</i>
<i>Компенсация влияния кабеля СМУ.....</i>	<i>180</i>
<i>Замыкание линий Guard-экрана между собой.....</i>	<i>181</i>
<i>Рассогласование импеданса.....</i>	<i>182</i>
<i>Использование матричного коммутатора Agilent.....</i>	<i>183</i>
<i>Рекомендации для выполнения измерений на частоте более 1 МГц.....</i>	<i>185</i>
Измерения емкости при высоковольтном смещении постоянного тока.....	186
<i>Высоковольтное смещение по Т-образной схеме.....</i>	<i>186</i>
<i>Измерение емкости мощных МОП-транзисторов.....</i>	<i>187</i>
<i>Подключение высоковольтного смещения постоянного тока к зондовой станции.....</i>	<i>198</i>
Приложение А: решения компании Agilent Technologies для параметрических измерений.....	200
Параметрические анализаторы полупроводников и приборов на их основе.....	200
Анализаторы мощных полупроводниковых приборов/характериографы.....	200
Модульные источники/измерители.....	201
Настольные источники/измерители.....	202
Матричные коммутаторы.....	203
Анализаторы импеданса.....	203
Приложение В: решения компании Agilent Technologies для измерений емкости на пластине.....	204

Приложение С: список рекомендаций по применению .....	205
Глоссарий .....	208
Алфавитный указатель .....	212
Об авторе .....	213

# Предисловие

*Эксперт – это человек, который совершил все возможные ошибки в очень узкой области.*

Нильс Бор

Получив просьбу написать эту книгу, я был сильно озадачен. Как можно рассказать все о параметрическом тестировании в одном издании? К счастью, я получил большую поддержку и помощь со стороны множества специалистов. Некоторым из них я приношу особую благодарность:

- *Томоюки Акияма* (эксперту по применениям, Agilent Technologies,) – за многочисленные и очень информативные рекомендации по применениям, которые он выпускал в течение многих лет.
- *Терри Берхэму* (эксперту по применениям, Cascade Microtech) – за его материалы по параметрическим измерениям непосредственно на кремниевой пластине, которые я свободно позаимствовал.
- *Ясуши Окава* (эксперту по применениям, Agilent Technologies) – за помощь в освещении высокоскоростных и быстрых импульсных сигналов.
- *Биллу Верзи* (инженеру по применениям, Agilent Technologies) – за помощь в описании измерений емкости тонкопленочной изоляции затвора.

Я также хотел поблагодарить всех, кто помог в редактировании данного документа. Несмотря на все усилия, которые были предприняты для устранения ошибок, несоответствий и неуклюжести языка, часть из них, несомненно, осталась, чтобы позабавить внимательного читателя. Часто говорят, что понять какой-либо предмет можно лишь после того, как сам начнешь учить этому предмету кого-нибудь еще. То же самое можно сказать о написании этого справочника по параметрическим измерениям. Необходимость изложить в нескольких словах огромный опыт, накопленный множеством людей, заставила меня пересмотреть свои знания, чтобы убедиться в том, что я на самом деле понимаю то, о чем рассказываю. Хотя эта работа потребовала огромных усилий, я выполнял ее с истинным наслаждением. И я надеюсь, что читая эту книгу, вы получите столько же удовольствия, сколько я во время ее написания.

*Ален Водсворф*  
Март 2012

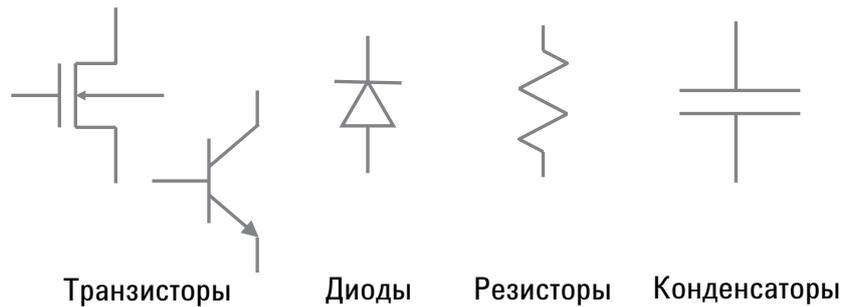
# Глава 1. Основы параметрического тестирования

*Основной задачей инженерии, в отличие от науки, является разработка новых устройств, процессов и систем.*

Майрон Трибас

## Что такое параметрический тест?

Вопрос о том, что такое параметрический тест, очень интересен и, возможно, еще будет обсуждаться. Тем не менее, в общем, параметрический тест включает электрическое тестирование и снятие характеристик полупроводниковых компонентов четырех типов: резисторов, диодов, транзисторов и конденсаторов. Это не означает, что параметрическому тестированию никогда не подвергаются компоненты других типов, однако подавляющее большинство параметрических тестов выполняется для одной из указанных категорий компонентов или их комбинаций.



**Рис. 1.1.** Параметрическому тестированию подлежат компоненты четырех основных типов

Подавляющее большинство параметрических тестов включает построение вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик (ВАХ и ВФХ).

Многие полагают, что параметрический тест – это тестирование по постоянному току, но это не совсем так. Используя источник питания/измеритель (SMU), можно выполнять измерения длительностью от нескольких миллисекунд до нескольких секунд. Но такие измерения слишком «медленные» с точки зрения стандартов функционального тестирования (которые требуют измерений в пико- и наносекундном диапазоне). В последнее время потребность в сверхбыстрых параметрических измерениях (с длительностью выборки 1 мкс и частотой дискретизации в наносекундном диапазоне) резко возросла. Это потребовало создания измерительных модулей нового типа (таких как генератор сигналов/быстродействующий измеритель или WGF MU). Все более важное значение приобретают сверхбыстрые измерения ВАХ и импульсной ВАХ, поскольку применение литографии для изготовления транзисторов сокращается, а в технологических процессах производства полупроводников используются все более экзотические материалы.

Важной частью параметрического тестирования является тестирование надежности. Тестирование надежности напрямую связано с известным уравнением Аррениуса, устанавливающим зависимость константы скорости химической реакции ( $k$ ) от температуры:

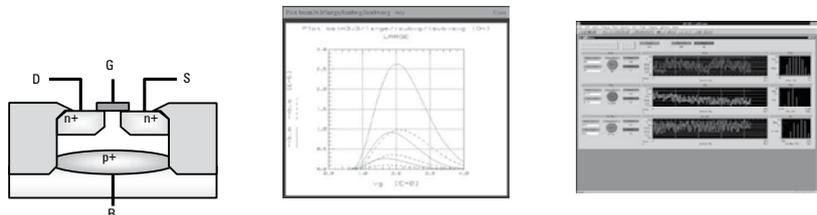
$$k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}$$

Где:  $A$  – предэкспоненциальный множитель  
 $E_a$  – энергия активации  
 $R$  – универсальная газовая постоянная  
 $T$  – температура в градусах Кельвина

При проверке надежности тестируемые устройства, как правило, подвергают воздействию сильных токов и/или высоких напряжений (величина которых больше, чем при нормальной работе), чтобы уменьшить значение энергии активации и тем самым увеличить вероятность отказа. С этой же целью очень часто увеличивают температуру. В ходе теста подсчитывается интенсивность отказов, которая с помощью специальных алгоритмов статистической обработки экстраполируется для получения интенсивности отказов при работе в нормальных условиях.

### Зачем выполняются параметрические тесты?

Задача параметрического теста – определить характеристики технологического процесса производства полупроводниковых приборов. В общих чертах параметрическое тестирование охватывает три основных области: разработку техпроцесса, моделирование техпроцесса и мониторинг параметров техпроцесса.



Разработка техпроцесса    Моделирование техпроцесса    Управление техпроцессом

**Рис. 1.2.** Три основные области применения параметрического тестирования: разработка процесса, моделирование процесса и мониторинг параметров техпроцесса

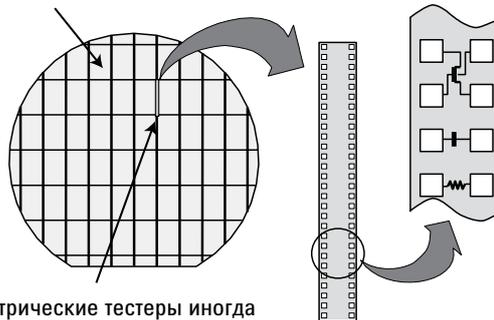
Первые две области относятся к лабораториям, исследовательским и проектным учреждениям или подготовке к производству, а последняя – непосредственно к производству. Очевидно, что каждая область применения предъявляет свои требования к оборудованию для параметрического тестирования. При разработке и моделировании техпроцесса используются настольные приборы, а на производстве – автоматизированные тестеры с высокой пропускной способностью.



**Рис. 1.3.** Производственный параметрический тестер с высокой пропускной способностью

Очень важно понимать, что параметрическому тестированию почти никогда не подвергается готовая продукция. Оно выполняется на специальных структурах и предназначено для сбора информации о самом техпроцессе. Параметрические тесты обычно выполняются непосредственно на полупроводниковых пластинах. При производственном тестировании структуры для параметрических тестов обычно расположены на линиях скрайбирования (надрезания), чтобы минимизировать площадь пластины, задействованную тестовым оборудованием. Но для тестирования в ходе разработки технологического процесса или для тестирования надежности нередко изготавливаются пластины, состоящие целиком из тестовых структур.

Функциональные тестеры испытывают кристаллы микросхем



Параметрические тестеры иногда испытывают специальные структуры на линии скрайбирования

**Рис. 1.4.** Для сохранения ценной полезной площади пластины параметрические тестовые структуры иногда располагаются на линиях скрайбирования

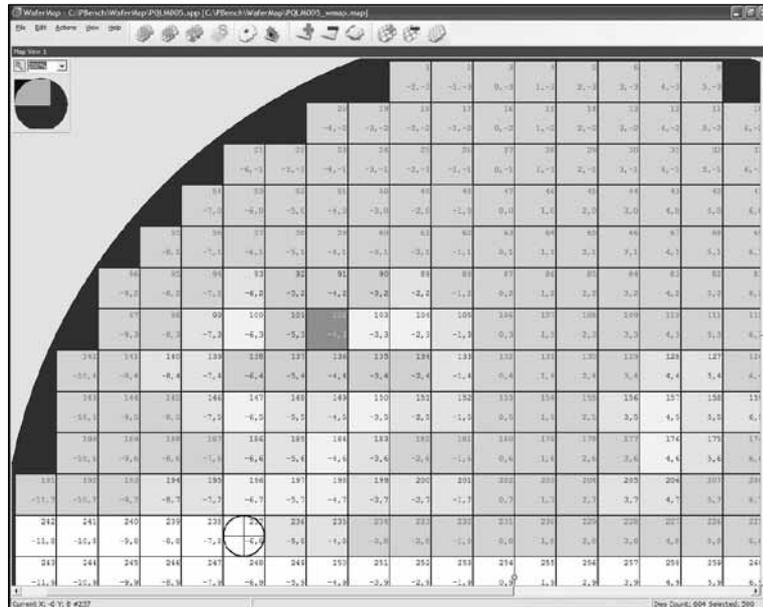
## Где выполняются параметрические тесты?

В ходе производства параметрический тест обычно выполняется на пластинах по завершении процесса их изготовления (т.е. после пассивирования), но перед отбраковкой кристаллов будущих микросхем по электрическим параметрам (E-sort).



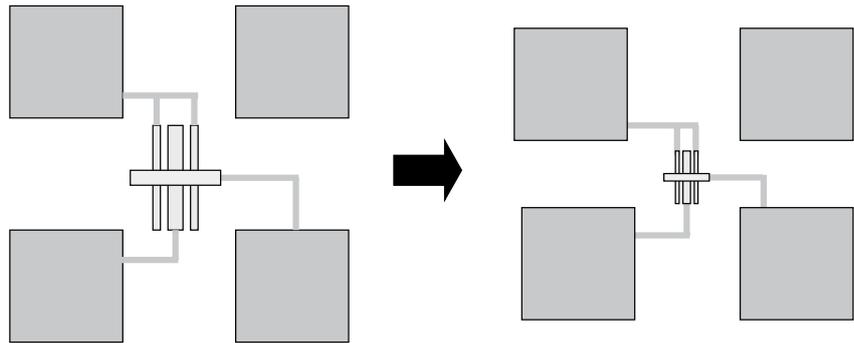
**Рис. 1.5.** Параметрический тест выполняется после изготовления пластины, но перед функциональным тестом

Тестированию подвергается каждая пластина из каждой партии, а результаты сохраняются в базе данных. Очевидно, что объем этих данных довольно велик, поэтому для их преобразования в различные форматы используются специальные программные инструменты. Одним из популярных форматов является карта полупроводниковой пластины, на которой для каждого кристалла пластины указываются скалярные величины с цветовой кодировкой диапазона их значений.



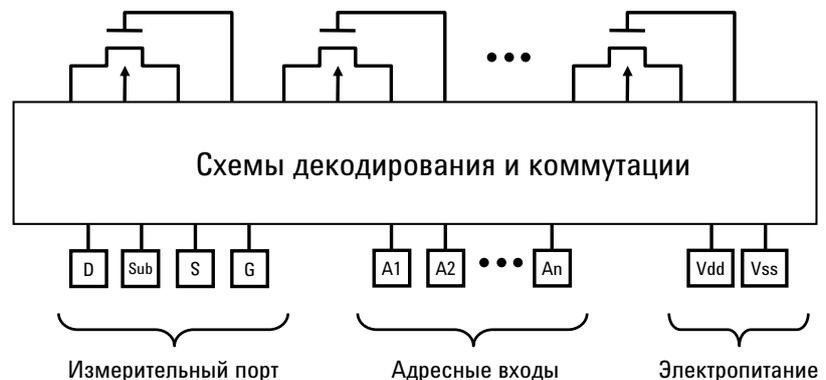
**Рис. 1.6.** Пример карты полупроводниковой пластины

Для детального анализа более сложных процессов может оказаться недостаточно обычных тестовых структур в линиях скрайбирования и даже тестовых кристаллов, расположенных по краю пластины. Более сложные процессы требуют расширенного тестирования, для которого бывает трудно поместить все необходимые тестовые структуры внутри доступной зоны. К сожалению, минимальные размеры выводов проб-карты имеют физические ограничения, связанные с возможностью изготовления и обеспечения разумного срока службы проб-карты, что, в свою очередь, задает физические пределы минимального размера контрольных контактных площадок. Это означает, что физические размеры площадок не могут уменьшаться по мере уменьшения размеров полупроводниковых устройств при переходе к технологическим процессам новых поколений.



**Рис. 1.7.** Размер контактных площадок нельзя уменьшать бесконечно, что накладывает ограничение на количество обычных тестовых структур, которые можно разместить на пластине

Одним из решений данной проблемы является использование матрицы, позволяющей тестовым устройствам использовать контактные площадки совместно, что позволяет добиться оптимального отношения числа тестовых устройств к числу площадок. Пример такой схемы показан ниже.



**Рис. 1.8.** Пример схемы адресуемой матрицы, используемой для производственного параметрического тестирования

По сравнению с обычными тестерами, адресуемые матрицы часто позволяют добиться значительного сокращения длительности теста, но их применение требует полного перепроектирования установок параметрического тестирования.

## История инструментария параметрического тестирования

Первыми приборами, способными выполнять нечто похожее на параметрические измерения, были аналоговые характериографы. Однако они имели ряд ограничений. Например, результаты измерений можно было увидеть только на экране ЭЛТ. Единственным способом сохранить подобные данные было сфотографировать экран, например, фотоаппаратом POLAROID. При этом не предоставлялось никакой фактической числовой информации.

### *1980-е годы*

В начале восьмидесятых годов компания Agilent Technologies (в те времена была частью компании Hewlett-Packard) представила первый в мире цифровой параметрический анализатор 4145А. Это был первый прибор, объединивший в одном корпусе четыре модуля «источник/измеритель» (SMU) (о них будет рассказано в Главе 3) и поставляемый вместе со специальным программным обеспечением (ПО). Подобно характериографу, анализатор 4145А отображал информацию в виде кривых. Но кривые состояли из отдельных точек, цифровые координаты которых могли сохраняться и анализироваться с помощью ПО. Появление данного прибора стало революцией в полупроводниковой промышленности. 4145А быстро вытеснил характериограф, за исключением некоторых специализированных приложений. В конце 1980-х гг. была представлена более совершенная модификация данного изделия – 4145В.



**Рис. 1.9.** Параметрический анализатор полупроводниковых приборов 4145В

### *1990-е годы*

В начале 1990-х гг. компания Agilent Technologies представила параметрические анализаторы полупроводниковых приборов 4155 и 4156. Они были построены на основе 4145А/В, возможности которого были расширены за счет цветного дисплея и клавиатуры, функции автоматического анализа данных, измерения с импульсным свипированием, режима выборки с увеличенными интервалами, режима измерения при повышенном постоянном или переменном напряжении и режима ожидания (и это далеко не все). Данные приборы выпускались в нескольких версиях (А, В и С), каждая из которых обладала большим набором функций по сравнению с предыдущей. В частности, версия С была дополнена функцией измерения квази-статической ВФХ (QSCV) и значительно усовершенствованным модулем контроля измерения (VMU).



**Рис. 1.10.** Прецизионный анализатор полупроводниковых приборов 4156С

#### *2000-е годы*

В начале XXI века стало ясно, что параметрические тесты становятся более сложными и необходимо комплексное решение, которое может не только строить ВАХ, но и выполнять другие измерения. Оно должно было измерять ВФХ и ВАХ, а также обладать гибкостью, позволяющей добавлять дополнительные измерительные функции в соответствии с будущими требованиями. В ответ на это компания Agilent Technologies в 2005 г. представила анализатор полупроводниковых приборов В1500А с ПО Agilent EasyEXPERT. Анализатор В1500А способен выполнять все задачи параметрического тестирования, от базовых ручных измерений до автоматизированных тестов на полупроводниковой пластине с помощью полуавтоматической зондовой станции. Поскольку В1500А использует операционную систему Microsoft® Windows® XP Professional, он легко интегрируется с PC-совместимыми компьютерами. Кроме того, знакомый графический интерфейс пользователя Windows и удобная система онлайн-подсказок позволяют свести к минимуму время обучения работе с прибором. В1500А уже полностью заменил 4155С и 4156С при решении современных задач параметрического тестирования.



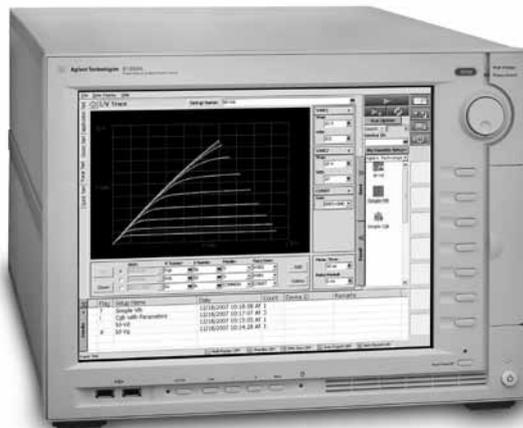
**Рис. 1.11.** Анализатор полупроводниковых приборов В1500А

В1500А является модульным прибором, поддерживающим модули различного типа. Модульность анализатора является очень важным достоинством, поскольку динамичное развитие параметрического тестирования постоянно требует добавления новых измерительных функций. Для параметрических тестов недостаточно просто использовать ресурсы SMU. Общепризнанными требованиями стали возможность измерения емкости, высокоскоростного тестирования и измерения быстрыми импульсными сигналами. Благодаря модульному построению прибор не будет устаревшим, когда понадобится добавить новые функции параметрического тестирования в соответствии с изменившимися измерительными задачами.



**Рис. 1.12.** Анализатор B1500A на 10 гнезд поддерживает различные типы модулей «источник/измеритель» (SMU), а также модуль для измерения емкости (CMU), модуль высоковольтного импульсного генератора (HVSPGU) и комбинированный модуль «генератор сигналов/быстродействующий измеритель» (WFGMU)

Для удовлетворения потребностей растущего рынка силовой электроники и для замены обычных аналоговых характериографов (которые больше не выпускаются основными производителями), компания Agilent Technologies в 2009 г. представила анализатор полупроводниковых приборов/характериограф B1505A. Он может генерировать токи до  $\pm 20$  А (в импульсном режиме) и напряжение до  $\pm 3000$  В. Кроме того, в режиме характериографа B1505A поддерживает ручное свипирование.



**Рис. 1.13.** Анализатор полупроводниковых приборов/характериограф B1505A

В отличие от аналоговых характериографов, B1505A совместим с ПК и использует то же дружественное ПО Agilent EasyEXPERT, что и B1500A.

Несколько новых функций в режиме характериографа обеспечивают анализатору B1505A существенные преимущества по сравнению с традиционными характериографами. Функция снимка экрана, с помощью которой можно сохранять кривые для последующего просмотра, позволяет легко сравнивать их с результатами текущего измерения. Функция стоп-сигнала позволяет графически определить область безопасной работы (по напряжению или по току), чтобы измерение мгновенно прекращалось при выходе кривой за эту область. Но самое полезное – это функция автоматической записи, которая регистрирует самые последние измерения кривых, позволяя воспроизводить и сохранять результаты, даже если прибор был случайно поврежден или полностью выведен из строя. Данные новации являются революционным прорывом в конструкции характериографов, позволяющим существенно сократить циклы измерения характеристик полупроводниковых приборов.

## Глава 2. Основы параметрических измерений

*Я часто говорю, что если вы можете измерить то, о чем рассуждаете, и выразить это в цифрах, то вы кое-что знаете об этом...*

*Но когда вы не можете измерить и не можете выразить результат измерения в цифрах, то ваши знания скудны и неудовлетворительны. Это может быть зачатком знания, но вряд ли в своем мышлении вы приблизились к научному подходу – и ничего другого быть не может.*

Уильям Томсон. «Лорд Кельвин»

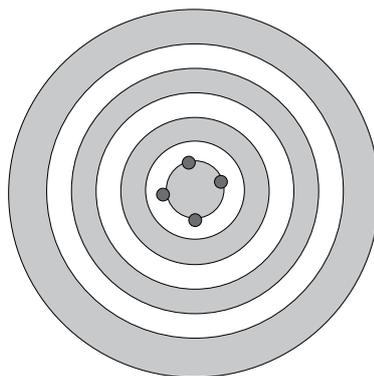
### Терминология измерений

Перед тем как начать измерения, необходимо определиться с основной терминологией. В частности, понимание смысла, заложенного в терминах «точность», «воспроизводимость» и «разрешающая способность», необходимо для уразумения сути параметрического тестирования и оценки возможности выполнения параметрических измерений, исходя из имеющихся ресурсов.

#### *Точность и воспроизводимость*

Понятия «точность» и «воспроизводимость» схожи по смыслу, но определяют различные величины. Точность – это степень соответствия измеренной или расчетной величины ее действительному (истинному) значению. Воспроизводимость (иногда употребляется термин «повторяемость») – это степень соответствия первоначально измеренной или расчетной величины результатам, полученным при повторных измерениях или вычислениях. Точность и воспроизводимость не связаны между собой напрямую. Измерения могут иметь высокую точность и высокую воспроизводимость, высокую точность и низкую воспроизводимость, низкую точность и высокую воспроизводимость или низкую точность и низкую воспроизводимость.

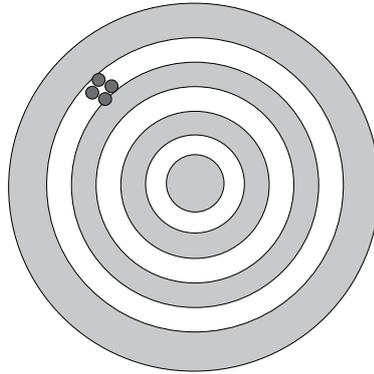
Аналогия, которая часто используется для объяснения этих терминов, – это мишень для стрельбы. Точки, сгруппированные вблизи центра мишени, но расположенные далеко друг от друга (как показано ниже), соответствуют высокой точности при низкой воспроизводимости.



Высокая точность, низкая воспроизводимость

**Рис. 2.1.** *Высокая точность и низкая воспроизводимость*

Группа точек, расположенная далеко от центра мишени, но близко друг к другу (как показано ниже) – это аналог низкой точности при высокой воспроизводимости.



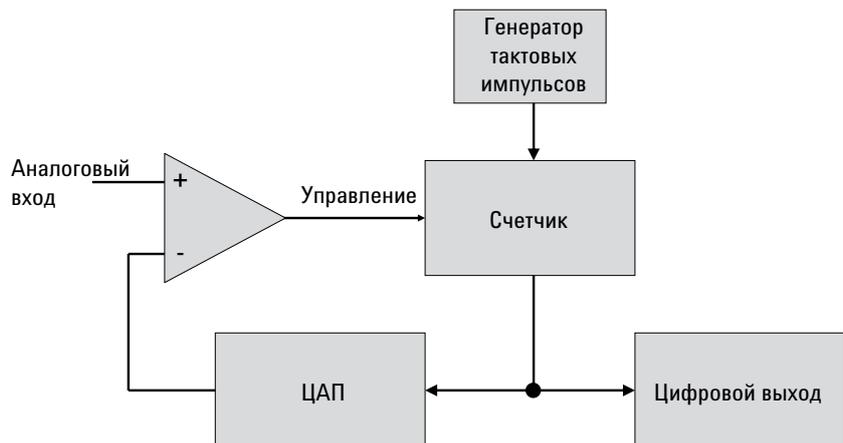
Низкая точность, высокая воспроизводимость

**Рис. 2.2.** Низкая точность и высокая воспроизводимость

Аналогии для двух оставшихся случаев также достаточно очевидны. Как правило, для параметрических измерений большее значение имеет воспроизводимость, а не абсолютная точность. Причина заключается в том, что параметрический тест подразумевает отслеживание тенденций, поэтому высокая воспроизводимость измерений чрезвычайно важна.

#### *Разрешающая способность*

Для параметрических тестов разрешающая способность (разрешение) – это как раз то, что позволяет оценить точность и воспроизводимость. В этом смысле данный параметр является наиболее важной характеристикой параметрического теста. Разрешающая способность представляет собой минимальную величину, которую способен точно измерить данный прибор. Проще всего объяснить это на примере схемы аналого-цифрового преобразователя (АЦП), упрощенный вариант которой показан на рисунке ниже.



**Рис. 2.3.** Упрощенная схема АЦП

Как следует из рисунка, минимальные измеряемые величины, которые прибор способен различить, определяются числом разрядов, доступных для цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). Это и есть разрешение. Например, разрешение 20 бит представляет собой способность различить одну часть из  $2^{20}$  (1 048 576) – т. е. приблизительно одну часть из миллиона.

Чтобы выразить разрешающую способность в единицах тока или напряжения, нужно знать диапазон измерений. Например, при диапазоне измерения, составляющем 5 В, АЦП измеряет напряжение от -5 В до +5 В, что (при 20-разрядном АЦП) позволяет различать измеренные величины, отличающиеся на:

$$\frac{(5 + 5)}{1\,048\,576} \approx 10 \text{ мкВ}$$

Однако из-за шумов и других факторов фактическое разрешение не равно указанному в таблицах технических характеристик. В табличном значении разрешения не учтены такие факторы, как тепловой шум, смещение рабочей точки и шумы усилителя, которые вносят элемент случайности в значения, приведенные в технических характеристиках. Как правило, табличное разрешение на 1-2 порядка лучше фактического.

#### *Прослеживаемость измерений*

Прослеживаемость измерений – свойство результата измерений или эталонного значения, обеспечивающее его взаимосвязь с опорными значениями национальных или международных эталонов посредством непрерывной цепи сличений, каждое из которых имеет установленную неопределенность. Для любой компании, выпускающей измерительное оборудование, очень важно обеспечить прослеживаемость измерений, поскольку именно она подтверждает их достоверность.

Существует ряд национальных метрологических институтов, обладающих стандартными метрологическими эталонами самого высокого качества. Цель всех этих институтов заключается в как можно более точном воспроизведении единицы СИ (такой как вольт, ампер, ом и т.д.). Некоторые из этих учреждений показаны ниже.

Наименование	Аббревиатура	Страна
Национальный институт стандартов и технологий	NIST	США
Национальный метрологический институт Японии	NMIJ	Япония
Национальная физическая лаборатория	NPL	Великобритания
Физико-технический институт Германии	PTB	Германия

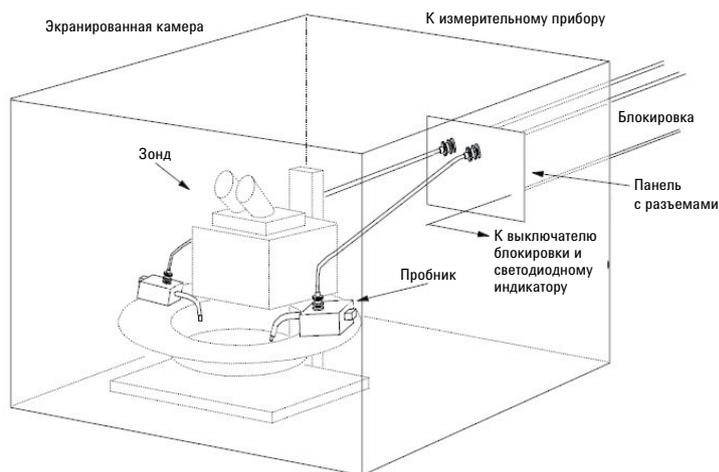
Компания Agilent Technologies использует стандарты, разработанные этими институтами, в качестве руководящих материалов при разработке процедур калибровки. Измерительные приборы Agilent Technologies имеют калибровочный сертификат, с которым они выпускаются с завода или который выдается после выполнения калибровки. Этот документ соответствует требованиям к прослеживаемости измерений, предъявляемым указанными национальными институтами.

## Guard- и Shield-экранирование

Новички часто путают два вида экранирования, хотя это совершенно разные понятия, которые преследуют совершенно разные цели. Назначение заземляемого Shield-экрана – исключить влияние электростатических помех на результаты измерений. Назначение Guard-экрана – предотвратить появление токов утечки при выполнении слаботоковых измерений (в фемтоамперном диапазоне). Заземляемый Shield-экран не работает как Guard-экран, а Guard-экран не обязательно обеспечивает хорошее экранирование от электростатических помех. Как правило, при измерении токов менее 1 наноампера следует использовать Guard-экран, а при измерении токов менее 1 пикоампера необходимо использовать и Guard- и Shield-экранирование.

*Shield-экранирование - способ обеспечить минимальный уровень собственных шумов*

Shield-экранирование или просто экранирование заключается в том, что зона выполнения измерений со всех сторон окружается токопроводящим материалом, подавляющим электростатические помехи. Из основ электромагнитной теории поля известно, что токопроводящий экран не позволяет электромагнитным сигналам проникнуть внутрь ограничиваемого им объема. Такой экран часто называют «клеткой Фарадея». Параметрическое тестирование обычно выполняется внутри экранированной камеры, например такой, как на рисунке ниже.

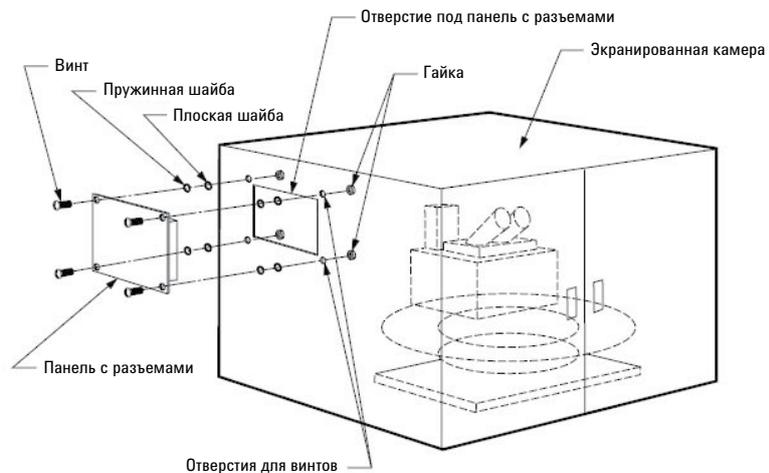


**Рис. 2.4.** Хорошо экранированная зона для выполнения параметрических измерений

Существует ряд практических рекомендаций, которыми следует руководствоваться, чтобы обеспечить надежное экранирование зоны измерений:

- Окружить зону измерений экраном из электропроводящего материала и использовать измерительные кабели в металлическом экране или оплетке.
- Электрически соединить внешний экран с экранами кабелей и с общим выводом (корпусом) измерительного прибора и/или землей.
- Для уменьшения емкости и влияния вибраций расположить внешний экран и измерительную схему как можно дальше друг от друга.
- Устранить «просачивание света» сквозь щели вокруг дверей и петель, через отверстия для ввода кабельных трубок и проводов, через разъемы и панели с разъемами, швы и стыки между панелями.
- Заполнить швы/зазоры/стыки токопроводящим уплотнением или прокладками.

Возникает разумный вопрос: если зона измерений полностью окружена экраном, то как выполняются электрические подключения? Решение заключается в использовании панели разъемов, специально предназначенной для этой цели.



**Рис. 2.5.** Использование панели разъемов для подключения через стенку экранированной камеры

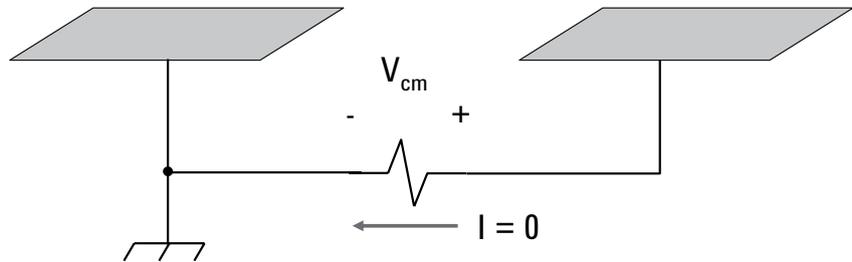
Специально для этих целей Agilent Technologies поставляет различные панели с разъемами для триаксиальных кабелей и кабелей с байонетными разъемами (BNC).

Ниже перечислен ряд ключевых моментов, которые необходимо учитывать для создания хорошо экранированной среды для выполнения измерений:

- Все проводники и объекты, имеющие электрический заряд (включая людей), должны находиться подальше от места измерения.
- Вокруг измерительной схемы вместо оболочки из изоляционных материалов следует установить оболочку из хорошо проводящих материалов.
- Следует избегать перемещений и вибраций вблизи места выполнения измерения (например, их могут вызвать потоки воздуха).
- При измерении токов менее 1 пА следует экранировать зону измерений с помощью проводящей (металлической) оболочки и соединить оболочку с общим выводом (экраном) измерительного прибора и/или землей.
- Следует минимизировать емкости между экранирующей оболочкой и измерительной схемой.

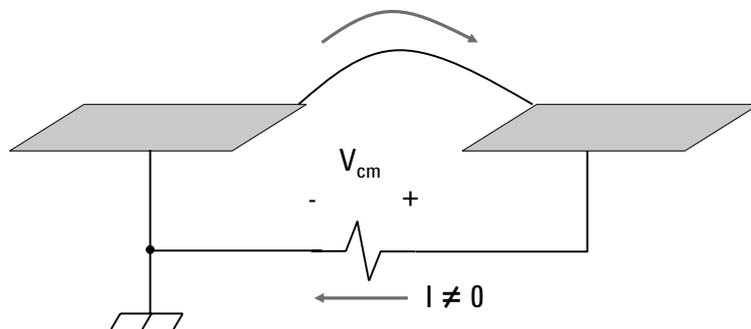
*Предотвращение образования паразитных контуров с замыканием через землю*  
 Существует одна общая проблема, связанная с использованием экранов – образование контуров с замыканием через землю. Если экраны всех приборов и кабелей измерительной схемы подключены к земле в разных точках, то потенциал земли в этих точках будет разным.

Рассмотрим простой случай с двумя проводящими плоскостями, подключенными к земле.



**Рис . 2.6.** Между проводящими плоскостями, соединенными только в одной точке, ток не протекает

Пока эти проводящие плоскости соединены только в одной точке, любое изменение синфазного напряжения ( $V_{cm}$ ) этих плоскостей не вызывает проблем, поскольку ток между ними протекать не может. Однако если заземленные плоскости соединены более чем в одном месте, то возникает контур, по которому через них может протекать значительный ток. Теперь синфазное напряжение может серьезно повлиять на результаты измерения параметров.

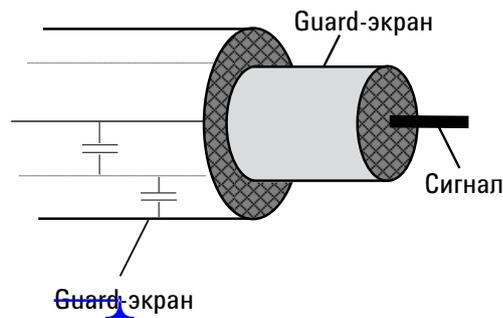


**Рис. 2.7.** Проводящие плоскости, соединенные в нескольких точках, образуют замкнутый контур (этого следует избегать)

Таким образом, при выполнении параметрических измерений следует избегать чрезмерного количества соединений с землей, хотя интуитивно может показаться, что так удобнее. Все проводники заземления следует соединить в одной точке.

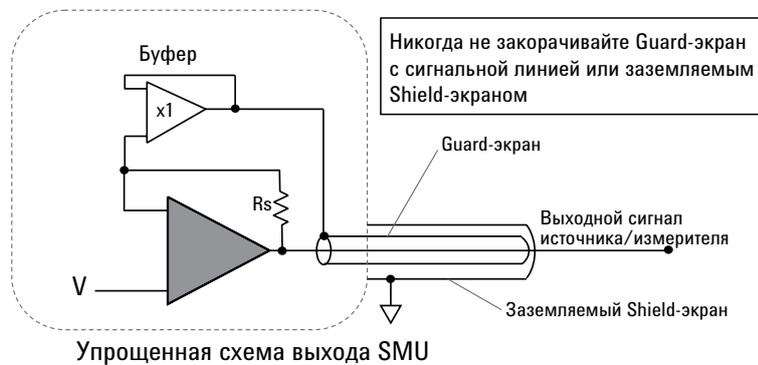
**Примечание.** Измерительные приборы почти всегда имеют собственный вывод заземления, соединенный с их корпусом, который в свою очередь соединен с землей. Изготовители приборов часто решают эту задачу путем использования трехжильных шнуров питания с проводником заземления. Поэтому для того чтобы убедиться в исправности заземления, зачастую достаточно проверить, что все шнуры питания используемых приборов подключены к общему разветвителю питания или сетевому фильтру.

*Guard-экранирование: минимизация токов утечки при измерении слабых токов*  
 Guard-экранирование создается путем окружения сигнальной линии активно управляемым проводником, на котором поддерживается потенциал, равный потенциалу сигнала, что позволяет избежать образования токов утечки. Хороший Guard-экран может быть создан только при использовании триаксиальных разъемов и кабелей. В триаксиальном кабеле сигнальная линия окружена слоем Guard-экрана (конечно, отделенного изоляционным материалом), который в свою очередь окружен заземленным Shield-экраном (естественно, также отделенным изоляционным материалом). На следующем рисунке показан триаксиальный кабель в разрезе.



**Рис. 2.8.** Триаксиальный кабель в разрезе: показаны паразитные емкости между Shield- и Guard-экраном, а также между Guard-экраном и сигнальным проводником

При возникновении паразитной емкости в кабеле, управляемый Guard-экран эффективно устраняет ее влияние путем изоляции сигнальной линии от заземляемого Shield-экрана. На схеме ниже показана структурная схема управления Guard-экраном триаксиального выхода.

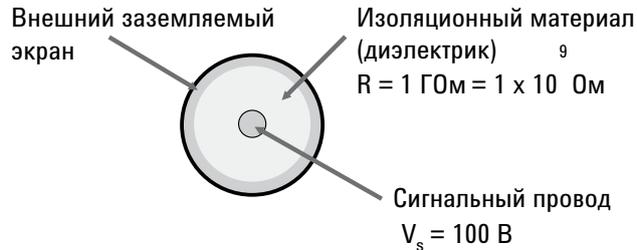


**Рис. 2.9.** Схема управления Guard-экраном в триаксиальном канале

Guard-экран активно управляется буферной схемой для поддержания на нем такого же потенциала, как на центральном проводнике (сигнальной линии) выхода SMU. Очевидно, что если замкнуть сигнальную линию с Guard-экраном или Shield-экраном, то выходная цепь может быть повреждена.

Неизбежен вопрос: «Почему мы должны использовать триаксиальный кабель для измерения слабых токов? В конце концов, в кабеле с разъемом BNC тоже используется изоляционный материал, так почему мы должны ожидать в нем каких-либо утечек тока?»

Проиллюстрировать необходимость использования триаксиального кабеля при измерении сверхслабых токов помогают простые расчеты. Предположим, что изоляционный материал имеет сопротивление 1 ГОм, а к центральному проводнику мы прикладываем напряжение 100 В.



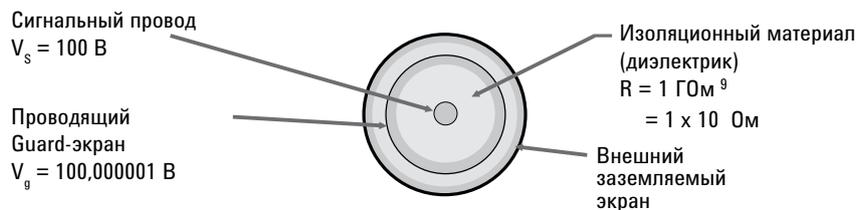
**Рис. 2.10.** Ток утечки при использовании коаксиального кабеля с разъемом BNC

Простой расчет показывает, что ток утечки будет равен:

$$i_{\text{утечки}} = \frac{100 \text{ В}}{1 \times 10^9 \text{ Ом}} = 1 \times 10^{-7} \text{ А} = 100 \text{ нА}$$

Очевидно, что если мы пытаемся измерить токи в фемтоамперном диапазоне тока ( $10^{-15}$ А), то невозможно использовать кабели с током утечки в 100 нА ( $10^{-7}$ А)!

Теперь рассмотрим тот же случай с использованием триаксиального кабеля. Мы предполагаем, что управляемый Guard-экран может отслеживать приложенное (сигнальное) напряжение с точностью до одной миллионной части (что является разумным и традиционным предположением).



**Рисунок 2.11.** Ток утечки при использовании триаксиального кабеля

В этом случае ток утечки будет равен разности между напряжениями на сигнальной и защитной линиях, поделенной на сопротивление изоляции между ними:

$$i_{\text{утечки}} = \frac{(100.000001 \text{ В} - 100 \text{ В})}{1 \times 10^9 \text{ Ом}} = \frac{1 \times 10^{-6} \text{ В}}{1 \times 10^9 \text{ Ом}} = 1 \times 10^{-15} \text{ А} = 1 \text{ фА}$$

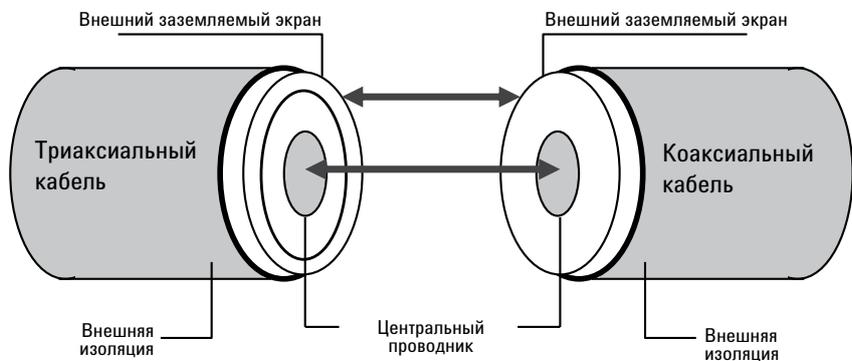
С помощью триаксиального кабеля с управляемым Guard-экраном мы уменьшили ток утечки до 1 фА, или в сто миллионов раз ( $10^8$ ) по сравнению с кабелем с разъемом BNC! Именно по этой причине все слаботочные параметрические измерения проводятся с использованием триаксиальных кабелей.

*Соединение триаксиального кабеля и коаксиального кабеля с разъемом BNC*  
 Вам неизбежно придется столкнуться с проблемой соединения коаксиального и триаксиального кабелей. При этом потребуется ответить на три основных вопроса:

1. Как подключить управляемый Guard-экран?
2. Как это повлияет на слаботочные измерения?
3. Где взять необходимые разъемы?

Рассмотрим их по очереди.

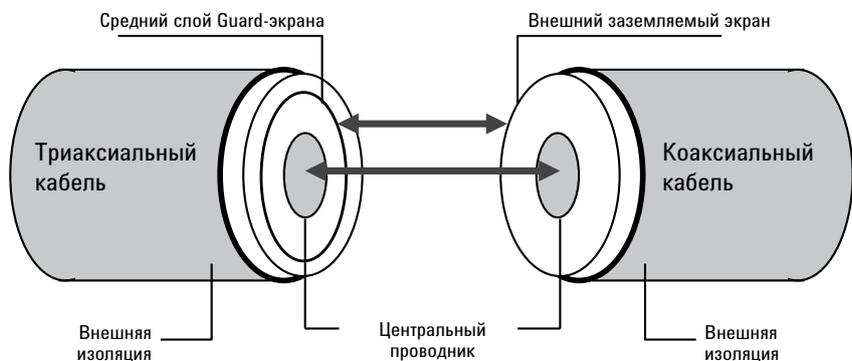
При соединении триаксиального разъема и разъема BNC главное – понять, как подключить регулируемую защиту. Вспомним, что управляемый Guard-экран нужен для того, чтобы измерять субнаноамперные токи. Поэтому при измерении токов более одного наноампера можно воспользоваться наиболее распространенным способом и просто подключить линию SMU к центральному проводнику кабеля с разъемом BNC, а экран – к внешнему заземленному экрану кабеля с разъемом BNC, как показано ниже.



**Рис. 2.12.** Соединение триаксиального кабеля с коаксиальным при выполнении измерений токов более 1 нА

Преимуществом этой конфигурации является простота. Мы не должны предпринимать каких-либо особых мер в отношении управляемого Guard-экрана.

Однако единственный способ для проведения корректных слаботочных измерений (токов менее одного наноампера) с использованием коаксиального кабеля с разъемом BNC заключается в том, что необходимо подключить управляемый Guard-экран к внешнему заземляемому экрану кабеля BNC, как показано ниже.



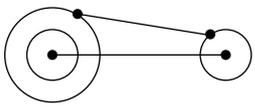
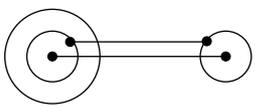
**Рис. 2.13.** Соединение триаксиального кабеля с коаксиальным при слаботочных измерениях

При такой конфигурации следует решить несколько важных проблем.

1. Внешний экран BNC-кабеля должен быть изолирован от земли.
2. Напряжение на внешнем экране BNC-кабеля может достичь опасного уровня (> 40 В), поэтому следует принять меры, гарантирующие надежную защиту пользователя от поражения электрическим током.

Чтобы предотвратить возникновение подобных проблем, некоторые производители зондовых станций предлагают готовые решения для изоляции экрана экрана BNC-кабеля от общей земли.

При выборе переходников с триаксиального разъема на разъем BNC следует четко понимать, для какой из двух указанных схем он будет использоваться. Если вы не уверены в правильном выборе переходника, то настоятельно рекомендуется «прозвонить» соединения мультиметром. Вы можете приобрести переходники с триаксиального разъема на разъем BNC в компании Agilent или у ряда сторонних поставщиков.

Номер по каталогу Agilent	Описание		Безопасно. Не подходит для слабых измерений
1250-2652	Триаксиальный (розетка) – BNC (вилка)		
1250-2653	Триаксиальный (вилка) – BNC (розетка)		
Номер по каталогу Agilent	Описание		<b>ВНИМАНИЕ!</b> <b>Опасность поражения электрическим током!</b> Требуется для слабых измерений
1250-2650	Триаксиальный (вилка) – BNC (розетка)		
1250-2651	Триаксиальный (розетка) – BNC (вилка)		
1250-1830	Триаксиальный (розетка) – BNC (розетка)		

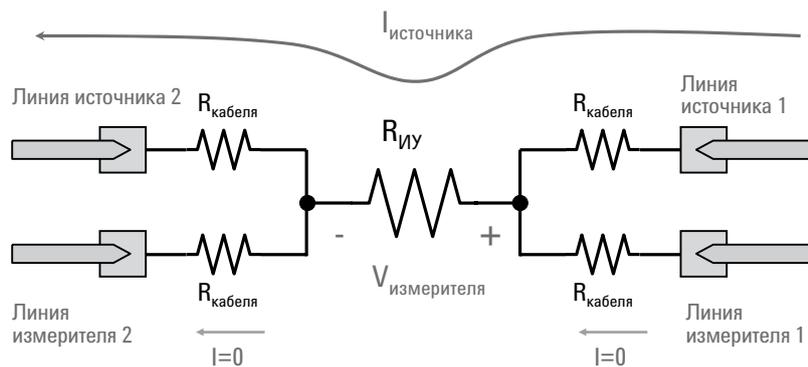
**Рис. 2.14.** Переходники для соединения триаксиальных разъемов и разъемов BNC, поставляемые Agilent Technologies

## Четырехпроводная схема измерения (метод Кельвина)

Обычный провод или кабель не является идеальным проводником. Все, что используется для подключения прибора к испытываемому устройству (ИУ), имеет некоторое собственное сопротивление (пусть даже очень маленькое). Очень важным является вопрос: «Когда следует учитывать это сопротивление кабеля»? Из этого следует другой вопрос: «Как можно устранить влияние сопротивления кабеля»? В данном разделе мы ответим на оба этих вопроса.

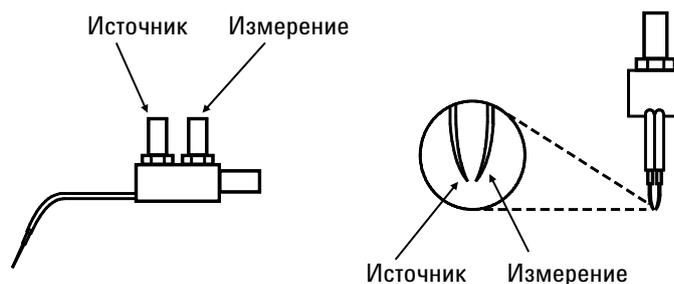
Каждый кабель можно представить в виде резистора. Сопротивление кабеля или провода, обычно используемого в параметрических тестах, очень мало (в диапазоне мОм). Очевидно, что если вы пытаетесь протестировать структуру, сопротивление которой на несколько порядков больше 0,1 Ом, то влияние сопротивления кабеля можно спокойно проигнорировать. Но предположим, что нужно измерить параметры структуры с сопротивлением, составляющим несколько Ом. В этом случае ошибка, вносимая сопротивлением кабеля, может существенно исказить результаты измерений.

Чтобы устранить влияние сопротивления кабеля, следует устранить падение напряжения, вызванное протеканием тока через кабель, и измерить только падение напряжения, связанное с проверяемой структурой. Мы можем сделать это, выполнив так называемое 4-проводное измерение. Для него нужно к каждому выводу тестируемой структуры подключить две отдельные линии. Одна пара линий используется для подачи тока от источника на ИУ, а другая пара – для передачи измеряемого напряжения. Важным моментом такого измерения является то, что мы отделили линии подачи тока от источника к ИУ от линий, используемых для измерения падения напряжения на устройстве. Поскольку по измерительным линиям передается измеряемое напряжение, то по ним практически не течет ток. Значит нет и падения напряжения, вызванного сопротивлением кабеля. Таким образом, влияние сопротивления кабеля устраняется. Этот метод часто называют измерением по схеме Кельвина в честь его изобретателя – знаменитого британского математика и физика лорда Кельвина (имя которого приведено в начале этой главы).



**Рис. 2.15.** Измерения по четырехпроводной схеме Кельвина позволяют компенсировать влияние сопротивления кабеля путем разделения линий подачи тока от источника и линий, передающих измеренное напряжение

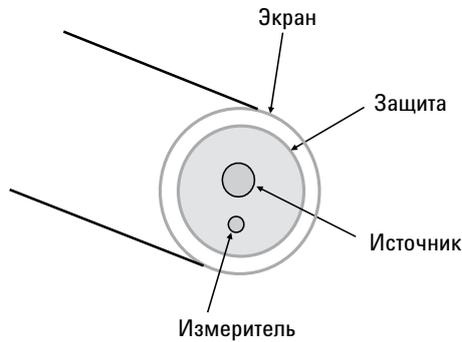
Для большей эффективности измерений по четырехпроводной схеме нужно, чтобы линии, соединяющие испытуемое устройство с источником и измерителем, были как можно короче. Многие производители зондовых станций выпускают триаксиальные позиционеры для измерений по четырехпроводной схеме, позволяющие подвести линии источника и измерителя прямо к контактной площадке для тестирования.



**Рис. 2.16.** Триаксиальные позиционеры для измерений по четырехпроводной схеме позволяют подвести линии источника и измерителя к контактной площадке ИУ

### Триаксиальные кабели Кельвина

Компания Agilent Technologies поставляет триаксиальные кабели Кельвина. Каждый такой кабель заменяет два стандартных триаксиальных кабеля. Разрез триаксиального кабеля Кельвина показан на рисунке ниже.



**Рис. 2.17.** Триаксиальный кабель Кельвина объединяет в одном кабеле линии источника и измерителя

Триаксиальный кабель Кельвина, как правило, обеспечивает более низкий уровень шумов по сравнению с использованием двух стандартных триаксиальных кабелей. Кроме того, конструкция разъема триаксиального кабеля Кельвина не позволяет ошибиться при подключении линий питания и датчика.

**Примечание.** Данный кабель следует заказывать только если все оборудование, которое планируется использовать (зондовая станция, коммутационная матрица и т. д.), позволяет установить такой разъем.



**Рис. 2.18.** Триаксиальный кабель Кельвина совместим с SMU Agilent и разнообразными панелями разъемов для зондовых станций

## Шумы при электрических измерениях

Шумы неотделимы от электрических измерений. Они возникают потому, что все электрические заряды являются дискретными. В этой короткой главе невозможно полностью описать все возможные виды шумов при параметрическом тестировании. Вместо этого мы дадим краткий обзор наиболее распространенных электрических шумов.

### *Дробовой шум*

Дробовой шум связан с природой электрического тока. Он возникает потому, что электрический ток состоит из потока электронов, которые имеют дискретный заряд. Величина, которую мы называем электрическим током, представляет собой среднее значение числа электронов, проходящих через данное сечение в секунду. Это определяется выражением:

$$I = nq$$

Где  $q$  – это величина заряда электрона, а  $n$  – среднее количество электронов, проходящих через данное сечение за единицу времени. Истинный ток  $i(t)$  зависит от времени и колеблется вокруг этого среднего значения в зависимости от фактического числа электронов, проходящих через данное сечение в любой момент времени. Следовательно, дробовой шум можно представить как:

$$i_{\text{дроб.}}(t) = i(t) - I = i(t) - nq$$

Сделав определенные идеализированные предположения, можно показать, что функция спектральной плотности дробового шума пропорциональна только заряду электрона и значению среднего тока:

$$S_i(f) \propto qI$$

Наиболее важной особенностью этой функции является то, что уровень спектра шума постоянен на всех частотах. Такой равномерный спектр называют белым шумом. Дробовой шум может особенно сильно влиять на параметрические измерения очень слабого сигнала в ИУ при наличии гораздо большего постоянного тока смещения.

Следует заметить, что приведенные выше результаты являются лишь приближительными. В действительности, можно легко убедиться, что функция спектральной плотности не может иметь постоянное значение на всех частотах. Если бы мы рассчитывали среднеквадратичное значение тока путем интегрирования функции спектральной плотности на всех частотах (от нуля до бесконечности), то в конечном итоге получили бы бесконечность. Это не имеет никакого физического смысла, поскольку не существует реального тока, который может давать мощность шума, равную бесконечности. Таким образом, должна существовать предельная верхняя частота, на которой функция спектральной плотности падает. Однако для большинства интересующих нас ситуаций в параметрическом тестировании эта частота настолько высока, что для простоты мы можем предположить, что дробовой шум имеет постоянный уровень во всем частотном диапазоне.

### *Тепловой шум*

Резисторы, через которые не протекает какой-либо ток, могут вызывать колебания напряжения из-за хаотического теплового движения электронов. Этот тепловой шум (также известный как *шум Джонсона*) является результатом колебаний напряжения, которые имеют нулевое среднее во времени значение, а функция спектральной плотности описывается уравнением, показанным ниже:

$$S_v(f) = 4kTR$$

В этом уравнении  $k$  – это постоянная Больцмана,  $T$  – температура в градусах Кельвина,  $R$  – сопротивление. Поскольку данная функция спектральной плотности не зависит от частоты, это тоже белый шум. Следует отметить, что фактический шум резистора будет больше, чем следует из представленного выше уравнения, за счет других тепловых процессов (таких как непрерывная генерация и рекомбинация носителей), которые происходят помимо теплового движения электронов. Иногда этот дополнительный шум вычисляется с помощью подставления в это уравнение «шумовой температуры», которая может быть гораздо выше фактической температуры резистора.

### *Фликкер-шум или шум 1/f*

Во многих полупроводниковых приборах наблюдается шум, который на низких частотах гораздо выше, чем можно было бы ожидать от дробового или теплового шума. Функция спектральной плотности этого типа шумов может быть описана следующим уравнением:

$$S_i(f) \propto \frac{1}{f^n}, \text{ где } 0 < n < 2$$

В большинстве случаев  $n$  почти равно 1. Различные виды шума типа  $1/f$  встречаются в природе и они активно изучаются во многих областях науки. В электронике шум типа  $1/f$  обычно называют фликкер-шумом, который вызван постоянным током. Шум  $1/f$  также называют «розовым шумом», чтобы подчеркнуть его промежуточное положение между «белым шумом» (который не зависит от частоты) и «красным» или броуновским шумом (который имеет зависимость от частоты вида  $1/f^2$ ).

### *Шум линии электропитания*

Одним из наиболее распространенных источников шумов при параметрическом тестировании является шум (наводки) от сети электропитания. Переменный ток, используемый для питания измерительных приборов, как правило, имеет частоту 50 или 60 Гц (в зависимости от стандарта конкретной страны). Этот ток создает мощные электромагнитные поля, накладывающие помехи на измеряемую величину. Воздействие таких помех можно уменьшить путем правильного экранирования. Но с уменьшением измеряемой величины воздействие электросети становится все более ощутимым. В этом случае единственным эффективным средством для устранения наводок от сети является усреднение измерений более чем за один период промышленной частоты. Такая возможность имеется практически во всех параметрических измерительных приборах. При внимательном изучении технического описания большинства приборов можно обнаружить, что высокое разрешение при измерениях на самом деле требует интегрирования по 16 периодам промышленной частоты. Интегрирование шума линии электропитания будет рассмотрено в главе 3.

## Глава 3. Основы построения модуля «источник/измеритель» (SMU)

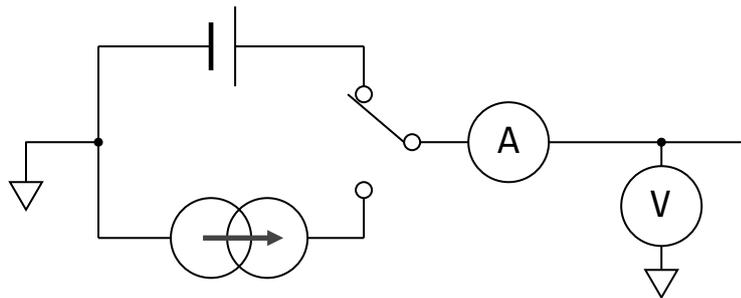
*Вы действительно не понимаете чего-то, если не можете объяснить это своей бабушке.*

Альберт Эйнштейн

### Обзор SMU

#### Введение

Первичным измерительным ресурсом для параметрического тестирования является модуль «источник/измеритель» или «источник питания/измеритель» (source/monitor unit – SMU). SMU может выдавать напряжение или ток и одновременно измерять напряжение и/или ток. Упрощенная эквивалентная схема SMU показана ниже:



**Рис. 3.1.** Упрощенная схема SMU

Поскольку SMU должны измерять очень слабые токи (менее 1 фА), они всегда оборудованы триаксальными выходами по причинам, обсуждавшимся ранее.

Существует множество различных типов SMU. Наиболее распространенным является SMU средней мощности (MPSMU). Как видно из его названия, такой SMU может выдавать умеренные уровни напряжения и тока ( $\pm 100$  В и  $\pm 100$  мА) при разрешающей способности измерения до 10 фА. Для прецизионных измерений имеется SMU высокого разрешения (HRSMU). Он выдает такие же ток и напряжение, как MPSMU, но при этом разрешение по току составляет менее 1 фА, а по напряжению – 0,5 мкВ. SMU высокой мощности (HPSMU) используется там, где требуются более высокие напряжения и токи, чем те, которые выдают MPSMU или HRSMU. Такой SMU может выдавать ток до  $\pm 1$  А и напряжение до  $\pm 200$  В, при этом его разрешающая способность измерения такая же, как и у MPSMU.

В дополнение к основным упомянутым выше SMU, некоторые SMU поддерживают дополнительный модуль, который позволяет им достичь разрешения при измерении тока 0,1 фемтоампер (100 аттоампер). Чтобы достичь такого уровня разрешения при измерении тока, реальный измерительный модуль должен быть размещен в непосредственной близости от испытуемого устройства. Это означает, что такой модуль должен быть установлен на зондовую станцию и соединен специальным кабелем с SMU, установленным в основном блоке параметрического анализатора. В анализаторе Agilent B1500A этот модуль называется модулем коммутации с атто-чувствительностью (ASU). Помимо обеспечения разрешающей способности измерения тока, равной 0,1 фА, модуль ASU также выполняет некоторые коммутационные функции, которые будут описаны в главе 4.

Модуль	HPSMU	MPSMU	HRSMU	ASU
Макс. напряжение источника	±200 В	±100 В	±100 В	±100 В
Максимальный ток источника	±1 А	±100 мА	±100 мА	±100 мА
Разрешение при измерении напряжения	2 мкВ	0,5 мкВ	0,5 мкВ	0,5 мкВ
Разрешение при измерении тока	10 фА	10 фА	1 фА	0,1 фА

**Рис.3.2.** Основные технические характеристики базовых типов модулей SMU

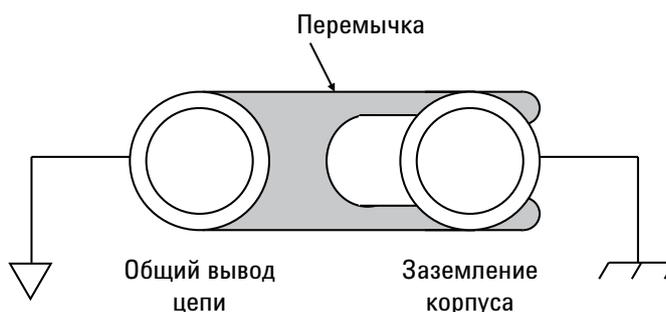
Анализатор B1505A поддерживает SMU двух специальных типов. SMU, рассчитанный на большие токи (HCSMU), работает в двух режимах: постоянного тока и импульсного. В режиме постоянного тока HCSMU может генерировать ток до ± 1 А при 40 В, а в импульсном режиме – ток до ± 20 А при 20 В. HCSMU имеет уникальную выходную конфигурацию и соединительные кабели, которые будут описаны ниже в этой главе. Высоковольтный SMU (HVSMU) может вырабатывать до 3000 В при 4 мА. Из-за высокого выходного напряжения HVSMU требуется использовать особый высоковольтный триаксиальный кабель, который снабжен специальным триаксиальным разъемом, закрепляемым винтами. Благодаря этому к данному модулю невозможно подсоединить стандартный триаксиальный кабель.

Модуль	HCSMU	HVSMU
Максимальное напряжение источника	±40 В (пост. ток) ±20 В (импульсный ток)	±3000 В
Максимальный ток источника	±1 А (пост. ток) ±20 А (импульсный ток)	±8 мА при ±1500 В ±4 мА при ±3000 В
Разрешение при измерениях напряжения	200 нВ	200 мВ
Разрешение при измерениях тока	10 пА	10 фА

**Рис.3.3.** Основные технические характеристики модулей HCSMU и HVSMU (только для B1505A)

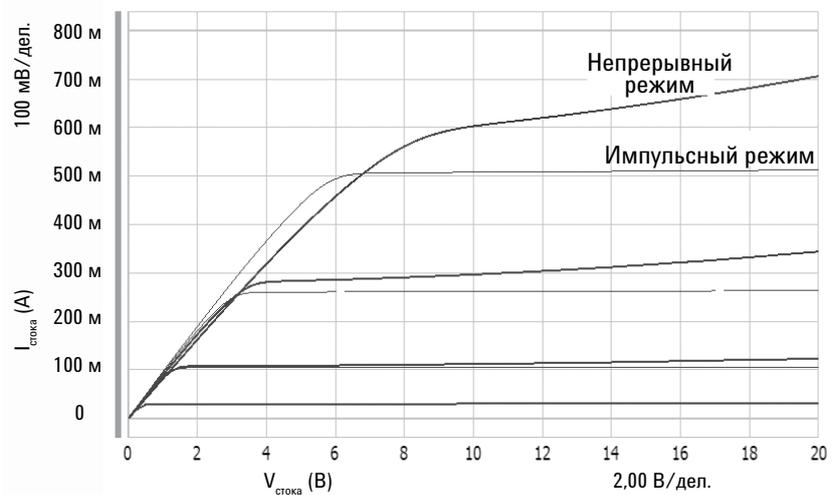
**Примечание.** Выходное напряжение и ток модуля HVSMU должны быть одинаковой полярности.

За исключением HCSMU, модули SMU являются несимметричными устройствами, один вывод которых всегда подсоединен к общей внутренней опорной точке. Опорный уровень SMU, как правило, связан с заземлением корпуса внешней переключкой, но эта переключка может быть удалена и тогда опорный уровень SMU может быть привязан к внешнему напряжению (максимум 42 В) с помощью разъемов различных типов.



**Рис. 3.4.** Вы можете отсоединить переключку от заземления корпуса, чтобы привязать выход SMU к общей цепи

Во всех SMU предусмотрены импульсный режим во время измерений со свипированием (используется для предотвращения нагрева термочувствительных устройств), а кроме того, SMU может проводить измерения с выборкой по времени. Однако импульсные измерения и измерения с выборкой по времени с помощью SMU выполняются относительно медленно (в микросекундном диапазоне). Поэтому важно понимать, когда для выполнения импульсных измерений можно использовать SMU, а когда вам требуется полупроводниковый генератор импульсов (SPGU) или модуль, объединяющий генератор сигналов и быстродействующий измеритель (WGFMU), который работает в наносекундном диапазоне. Эти решения будут рассмотрены подробно при обсуждении высокоскоростных измерений в главе 5. Поскольку триаксиальные кабели и пробники постоянного тока не могут обеспечить высокого быстродействия, их можно использовать совместно с SMU при выполнении импульсных измерений и измерений с выборкой по времени. Однако как будет показано в последующих главах, при выполнении импульсных и быстрых измерений с помощью модулей других типов (таких как HV-SPGU и WGFMU) для достижения оптимальных результатов измерений требуются специальные кабели и ВЧ пробники.



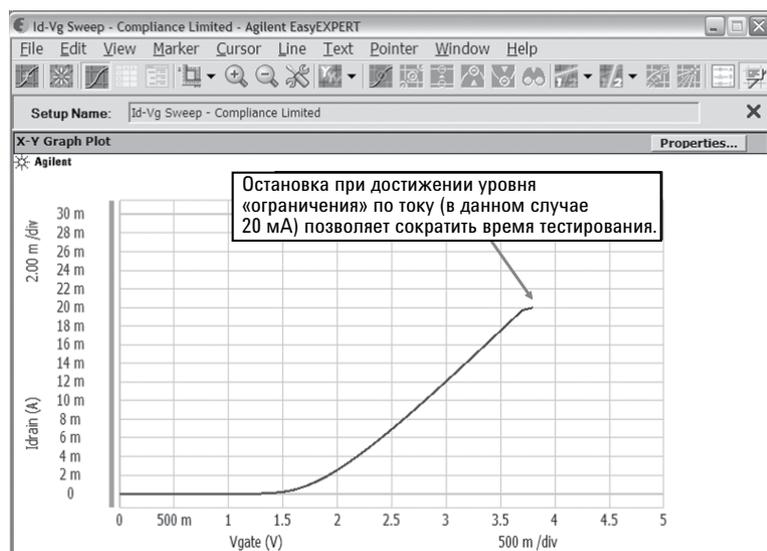
**Рис.3.5.** При измерениях со свипированием SMU может работать в импульсном режиме, чтобы предотвратить саморазогрев ИУ, способный исказить результаты измерений, как показано на приведенном выше графике зависимости  $I_{\text{сток}}$  от  $V_{\text{сток}}$  для полевых транзисторов с МОП структурой

### Режимы работы и настройки SMU

SMU имеет три основных режима работы: источник напряжения, источник тока и общий режим. В общем режиме SMU действует как источник нулевого напряжения; он не может выполнять какие-либо измерения, а ток «ограничения» автоматически принимает максимальное значение. Кроме того, для измерений со свипированием можно использовать тот же SMU в режиме импульсного напряжения или импульсного тока для предотвращения саморазогрева термочувствительных устройств.

SMU позволяет задавать настройку параметра ограничения (compliance). Она всегда противоположна параметру источника SMU. (Если SMU работает в режиме источника напряжения, то для него можно задать ограничение по току, соответствующего заданному напряжению. Если SMU работает в режиме источника тока, то для него можно задать ограничение по напряжению, соответствующего заданному току.) Когда выходные параметры SMU достигают заданного ограничения, он действует как источник постоянного напряжения или тока. Данная функция предотвращает случайное повреждение устройства, не позволяя измеряемой величине превышать указанное значение «ограничения». Кроме того, для источников со свипированием можно также задать ограничение по мощности. В этом случае полная выходная мощность SMU будет ограничена заданным значением. Если задать и ограничение по току или напряжению, и ограничение по мощности, то SMU никогда не превысит меньшую из этих двух настроек.

В таблице «Measurement Setup» (Настройка измерений) ПО Agilent EasyEXPERT можно задать различные настройки уровней «ограничения» для каждого SMU. Кроме того, имеется меню выбора «Sweep Status» (Состояние свипирования), которое позволяет выбрать «CONTINUE AT ANY» (Продолжить при любом значении) или «STOP AT ANY ABNORMAL» (Остановить при аномалии). В первом случае измерения будут продолжены вне зависимости от появления каких-либо аномалий (таких как ошибка измерений, достижение уровня «ограничения» и т. д.). При выборе второго варианта тестирование будет немедленно прекращено при обнаружении любого аномального условия. Данная функция особенно полезна при автоматизированных измерениях (когда невозможно контролировать состояние прибора в процессе измерений). Остановка работы в случае появления какой-либо аномалии позволяет избежать потерь времени на выполнение ненужных измерений. Пример приведен ниже.



**Рис. 3.6.** Функция остановки при обнаружении аномалий позволяет автоматически прекратить тестирование при достижении уровня «ограничения» и исключить выполнение ненужных измерений

### Выходы источника и измерителя SMU

Ситуации, требующие измерений по четырехпроводной схеме, и основные положения теории измерений Кельвина уже обсуждались. Разделив линии источника и измерителя, можно устранить влияние сопротивления кабеля на результат параметрических измерений. Чтобы облегчить выполнение этой задачи, в современных SMU предусмотрены выходы для источника и измерителя. На следующем рисунке показана конфигурация выхода SMU для измерений по четырехпроводной схеме.

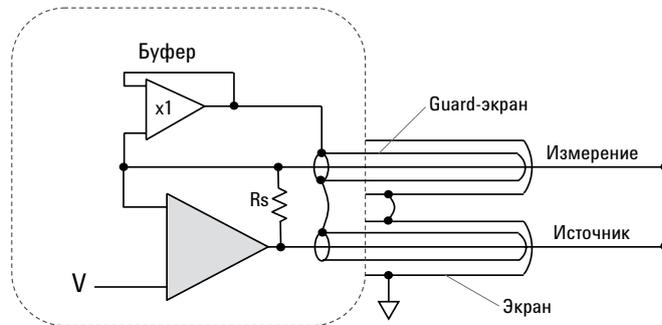


Рис. 3.7. Упрощенная схема выхода SMU для измерений по четырехпроводной схеме

Большим преимуществом данной конфигурации является то, что для выполнения измерений по четырехпроводной схеме достаточно только двух таких SMU, как показано на рисунке ниже:

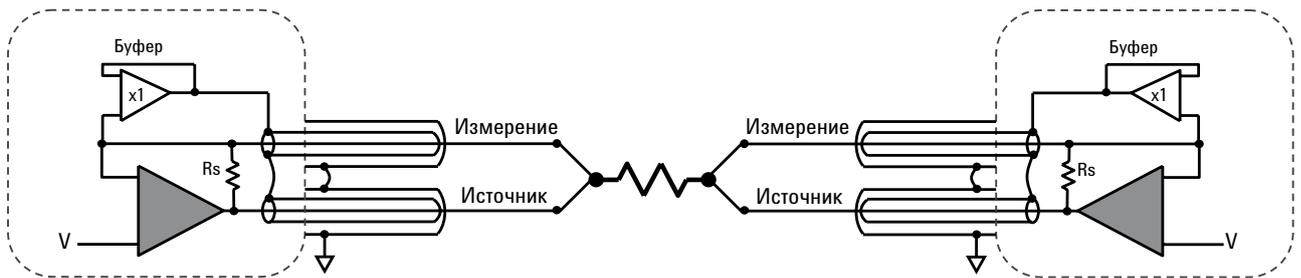
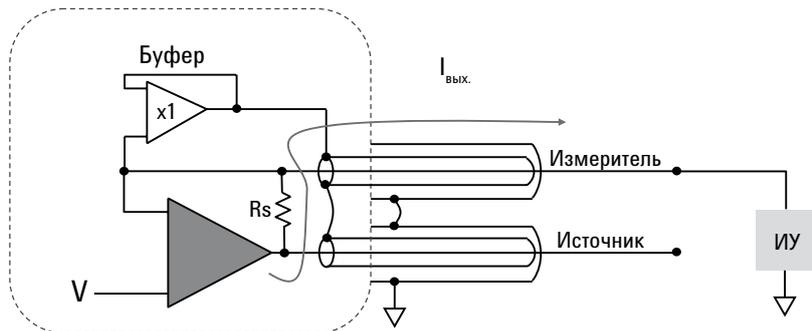


Рис. 3.8. Выполнение измерений сопротивления по схеме Кельвина с помощью двух SMU

Для большей эффективности измерений по четырехпроводной схеме нужно, чтобы линии, соединяющие испытуемое устройство с источником и измерителем, были как можно короче (это достигается, например, с помощью триаксиальных позиционеров Кельвина), поскольку какие-либо дополнительные сопротивления за точкой соединения будут влиять на результаты измерений.

Во многих случаях, когда не требуется выполнять измерения по схеме Кельвина, важно понимать, какой выход SMU нужно использовать. Когда не нужно выполнять измерений по четырехпроводной схеме и требуется задействовать только один выход SMU, то всегда следует использовать выход источника (разъем Force). Линии источника и измерителя соединены внутри SMU через резистор  $R_s$ . Эта внутренняя точка измерителя является узлом с высоким сопротивлением, поэтому SMU не имеет проблем с контролем тока и напряжения на выходе источника, когда используется только линия источника.

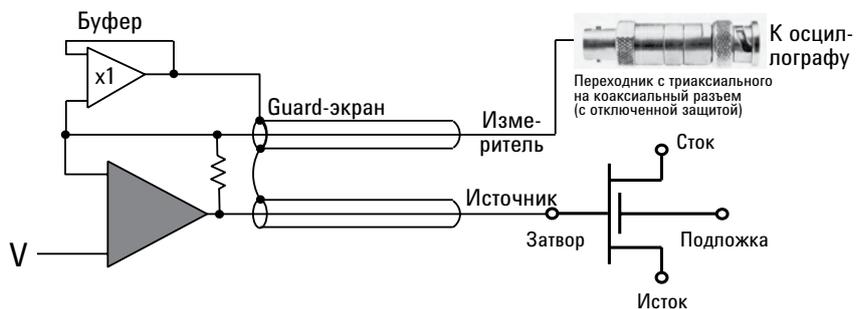
Теперь рассмотрим, что происходит, если используется только линия измерителя (Sense). В этом случае весь ток, вытекающий из выхода измерителя (или втекающий в него), должен пройти через внутренний резистор, как показано на схеме ниже.



**Рис. 3.9.** Проблема, возникающая при использовании только линии измерителя в SMU Кельвина

Это приведет к искажению всех результатов измерений и вы получите совершенно неправильные данные! **Никогда не подключайте к испытываемому устройству только линию измерителя SMU Кельвина.**

При измерениях не по четырехпроводной схеме можно использовать линию измерителя SMU как буфер для мониторинга напряжения источника SMU. Наиболее распространенный случай – когда Вы управляете затвором полевого транзистора с МОП-структурой (MOSFET) через линию источника SMU и хотите контролировать напряжение на затворе. Вы можете подключить линию измерителя SMU прямо к входу осциллографа с помощью переходника с триаксиальным на коаксиальный разъем (с отключенным Guard-экраном), как показано ниже.



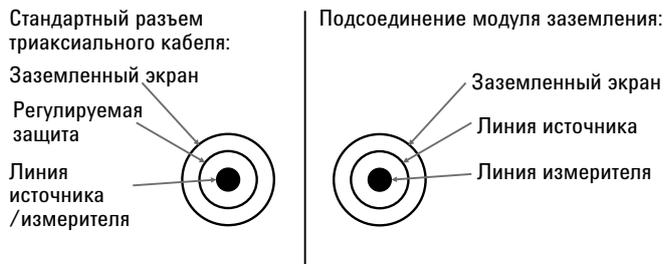
**Рис. 3.10.** Если линия измерителя SMU не используется, то ее можно подключить к осциллографу для контроля выхода SMU

**Примечание.** При подключении какой-либо нагрузки к выходу SMU необходимо соблюдать осторожность, так как существует определенный предел для емкости нагрузки. Подключение больших емкостных нагрузок к выходам SMU может привести к осцилляции, поэтому следует убедиться, что входная емкость осциллографа не превышает установленного предела нагрузочной емкости SMU.

## Описание работы модуля заземления

Модуль заземления (GNDU) – это SMU особого типа, который не имеет измерительных функций. Его задача – обеспечить активное заземление для совместного использования с другими модулями. Модуль заземления всегда будет поддерживать напряжение 0 В, пока не будет превышено заданное максимальное значение втекающего или вытекающего тока (например,  $\pm 4,2$  А для Agilent B1500A и B1505A). Преимущество активного заземления над пассивным очевидно: вам не нужно беспокоиться о падении напряжения на сопротивлении при больших токах, что приводит к искажению результатов измерения (по крайней мере, если поддерживаются условия выполнения измерений по четырехпроводной схеме).

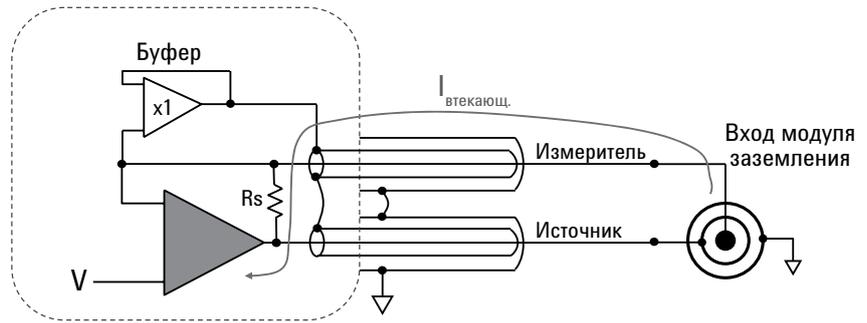
Конфигурация разъема модуля заземления приводит в замешательство многих пользователей. Это вполне понятно, поскольку разъемы модуля заземления и стандартного триаксиального кабеля очень похожи, но различаются назначением выводов проводников. Особая конфигурация модуля заземления вызвана историческими причинами, поскольку в прошлом на некоторых приборах просто не было достаточно места для отдельного размещения линий источника и измерителя для модуля заземления. Поэтому линии источника и измерителя были объединены в одном разъеме. Стандартный разъем триаксиального кабеля и разъем модуля заземления сравниваются на рисунке ниже.



**Рис. 3.11.** Сравнение стандартного разъема триаксиального кабеля и разъема модуля заземления

Модуль заземления имеет конфигурацию, которая всегда поддерживает нулевой потенциал линий источника и измерителя, поэтому нет необходимости изолировать их от внешнего заземленного экрана, чтобы предотвратить утечки тока. Следует отметить, что случай с модулем заземления – единственный, в котором такая схема может работать.

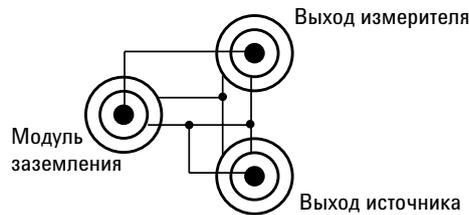
На рисунке ниже показана проблема, возникающая при подсоединении модуля заземления аналогично подсоединению стандартного триаксиального кабеля.



**Рис.3.12.** Проблема, возникающая при подсоединении модуля заземления аналогично подсоединению стандартного триаксиального кабеля

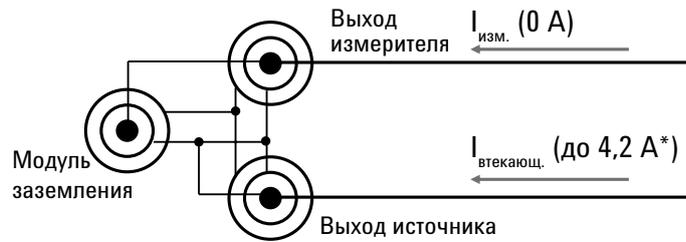
Из рисунка видно, что при подсоединении модуля заземления аналогично подсоединению стандартного триаксиального кабеля, к SMU Кельвина будет подключена только линия измерителя. Очевидно, что это приведет к ошибочным результатам измерений.

На следующем рисунке показано, как правильно подсоединить модуль заземления к стандартному разъему SMU. Для подсоединения модуля заземления к SMU компания Agilent предлагает адаптер N1254A-100, который связывает выход модуля заземления с выходами источника и измерителя, как показано ниже.



**Рис.3.13.** Правильное подсоединение модуля заземления к стандартному триаксиальному разъему

Конечно, адаптер модуля заземления можно использовать, только подсоединив выход источника, как и в стандартном SMU. Однако при этом следует соблюдать осторожность. Мы полагаем, что одной из причин использования модуля заземления является втекание больших токов, а для измерения больших токов, по определению, требуется подсоединение по четырехпроводной схеме (с использованием выходов измерителя и источника). Поэтому, особенно если вы используете модуль заземления для приема тока от одного или нескольких SMU высокой мощности, настоятельно рекомендуется подсоединить модуль заземления в конфигурации Кельвина, как показано ниже.



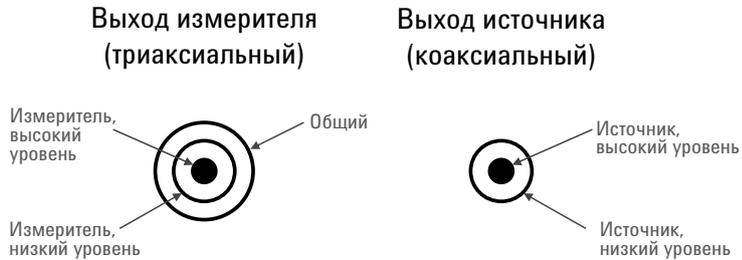
\*B1500A и B1505A

**Рис.3.14.** Для приема больших токов следует использовать модуль заземления в конфигурации Кельвина

**Примечание.** Компания Agilent выпускает специальные триаксиальные кабели для подключения к выходу источника модуля заземления. Данные кабели рассчитаны на максимальный ток 4,2 А. Их каталожные номера: 16493L-001 (1,5 м), 16493L-002 (3 м) и 16493L-003 (5 м).

## Подсоединение сильноточных SMU (B1505A)

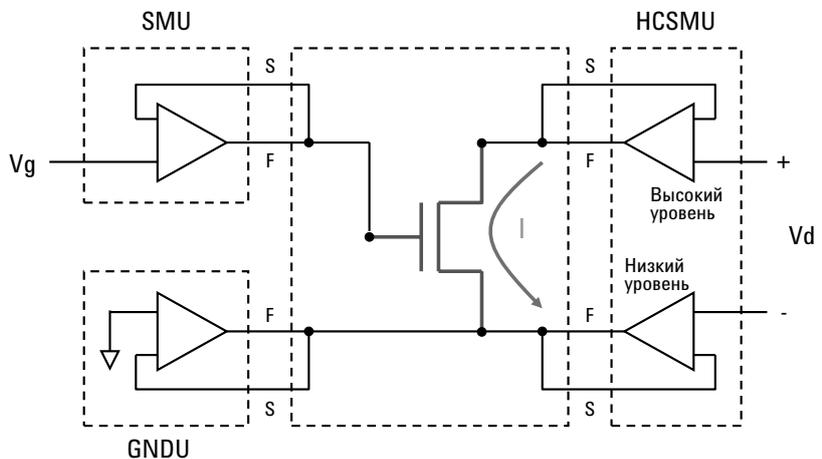
Как говорилось ранее, сильноточный SMU (HCSMU) – это специальный модуль, устанавливаемый только в анализатор B1505A. По своей схеме он похож на обычный SMU и отличается только тем, что вырабатывает ток до 20 А (в импульсном режиме). Так как никакой другой модуль не может принимать такой ток, то HCSMU должен принимать и свой собственный ток. Поэтому HCSMU обладает уникальной выходной конфигурацией.



**Рис. 3.15.** Выходные соединения HCSMU

Поскольку по линиям источника HCSMU не передается измерительный сигнал, им не требуется экранирование и они могут быть коаксиальными. С другой стороны, по измерительным линиям HCSMU передается измерительный сигнал, поэтому им требуется экранирование и они должны быть триаксиальными. К счастью, именно поэтому перепутать два выхода невозможно.

Модуль HCSMU имеет выходы с гальванической развязкой, которые не имеют внутренней связи с «землей» прибора. Это означает, что при выполнении измерений, его выходы источника и измерителя должны быть связаны с опорным уровнем (обычно через модуль заземления). Пример схемы измерения характеристик транзистора MOSFET с помощью HCSMU показан ниже.



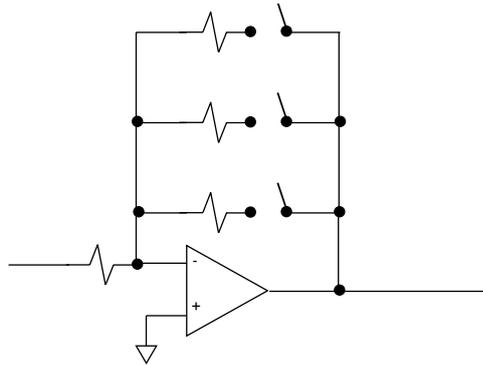
**Рис. 3.16.** При выполнении измерений выходы низкого уровня источника и измерителя HCSMU должны быть связаны с известным опорным уровнем

Когда вы используете HCSMU с испытательной оснасткой N1259A, выдерживающей высокую мощность, следует позаботиться о правильной разводке HCSMU соединений. Кроме того, вы должны убедиться, что используете подходящие кабели и адаптеры при подключении HCSMU к зондовой станции. Для этой цели Agilent Technologies предоставляет различные переходники и разъемы. Они будут рассмотрены более подробно в главе 4, когда будет обсуждаться проведение измерений на полупроводниковой пластине.

## Выбор диапазона измерений

### Основы выбора диапазона измерений

Выбор диапазона измерений тесно связан с точностью и разрешением измерений. Однако прежде чем приступить к выбору, важно понять, почему для SMU в первую очередь требуется установить диапазон измерений. Схема SMU должна подключать и отключать (с помощью реле) сопротивления различных номиналов, чтобы она могла выдерживать максимальный ожидаемый ток или напряжение, исходя из первоначальной настройки «ограничения», заданной пользователем. Пример такой схемы приведен ниже.

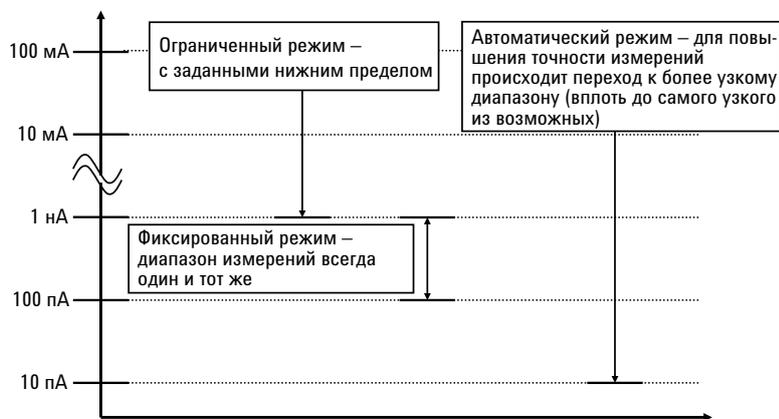


**Рис.3.17.** При выборе диапазона SMU подключаются/отключаются резисторы разных номиналов

С помощью реле подключаются один или несколько соответствующих резисторов, и SMU переходит в заданный диапазон измерений. Очевидно, что переключение реле и переход с одного диапазона на другой занимает некоторое время. Если бы SMU всегда начинал измерения в максимально широком диапазоне и последовательно продолжал работать, сокращая его до самого узкого диапазона, в котором содержится измеряемое значение, то процесс измерений был бы крайне медленным. Имея гибкую возможность выбора диапазона измерения, пользователь может достичь компромисса между скоростью и точностью измерения.

Для SMU имеется три режима выбора диапазона: фиксированный, ограниченный и автоматический. На рисунке ниже показано, каким образом происходит выбор диапазона измерений SMU в каждом из этих режимов.

Диапазон измерения тока



**Рис.3.18.** Пояснения к трем режимам выбора диапазона измерений: фиксированному, ограниченному и автоматическому

По скорости режимы выбора диапазона можно классифицировать следующим образом: фиксированный (самый быстрый), ограниченный (более медленный) и авто (самый медленный). Хотя фиксированный режим позволяет быстрее получить результаты измерений, он имеет ограничения: SMU не будет переключаться на более узкий диапазон измерений для повышения их точности. Кроме того, если вы попытаетесь измерить в фиксированном диапазоне токи или напряжения, значения которых превышают верхнюю границу фиксированного диапазона измерения, то возникнет ошибка измерения. Измерения в ограниченном диапазоне и с автоматическим выбором диапазона схожи в том, что в обоих случаях измерения начинаются в самом широком диапазоне, который содержит заданное пользователем значение «ограничения», и в обоих случаях выполняются переходы к более узкому диапазону, пока не будет найден оптимальный диапазон измерения. Разница между двумя режимами выбора заключается в том, что в ограниченном режиме диапазон измерений никогда не перейдет указанный пользователем нижний предел. Таким образом, ограниченный режим полезен, когда вы не знаете приблизительное значение измеряемого тока или напряжения, и вам не нужны сверхточные измерения. Однако если вам обязательно нужно выполнить измерения с наивысшей точностью, а время измерения не имеет значения, то следует установить режим автовыбора диапазона.

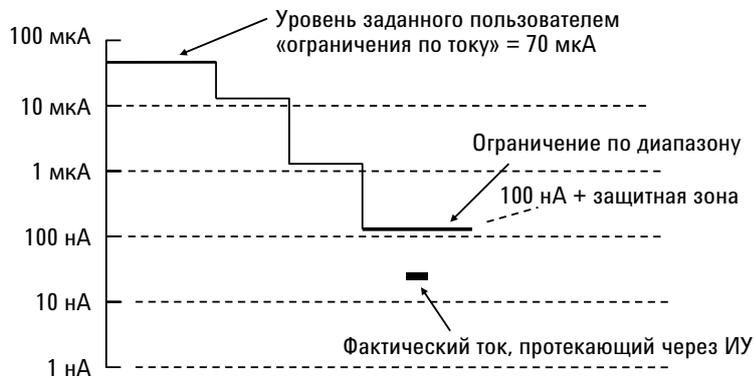
Не существует четких простых правил определения разрешения измерений, выполняемых в пределах конкретного диапазона. В главе 2 при обсуждении разрешающей способности измерений отмечалось, что основным определяющим фактором является количество разрядов в аналого-цифровом преобразователе (АЦП) SMU. Однако при оценке фактически достижимого разрешения измерения необходимо учитывать и другие факторы, такие как шум, дрейф, и т.д. Они приводят к появлению случайных составляющих в полученных результатах, что приводит к необходимости их усреднения. В силу этого, в большинстве случаев минимальное разрешение измерения на 4-5 порядков меньше ширины диапазона измерения. Заметьте, что некоторые SMU могут иметь более одного АЦП; в этом случае необходимо убедиться, что вы проводите оценку значения разрешения измерения именно для того АЦП, который используете.

Есть один важный для понимания момент, касающийся использования фиксированного диапазона измерений. О нем упоминалось выше, но стоит повторить еще раз.

При измерениях в фиксированном диапазоне можно измерить меньшие значения тока или напряжения, чем позволяет выбранный диапазон измерения, поскольку, как отмечалось выше, разрешение измерения на 4-5 порядков меньше ширины диапазона измерения. Даже если фактическое измеряемое значение более чем на 4-5 порядков меньше выбранного диапазона измерения, то прибор будет выдавать воспроизводимые результаты (хотя и с пониженным разрешением измерения). Тем не менее, если попытаться измерить ток или напряжение, значения которых находятся за пределами указанного фиксированного диапазона измерения, то при измерении появится ошибка. Следовательно, определение оптимального фиксированного диапазона измерения — это всегда балансирование между выбором диапазона достаточно узкого для обеспечения нужного разрешения измерения и достаточно широкого, чтобы в него всегда попадало измеряемое значение.

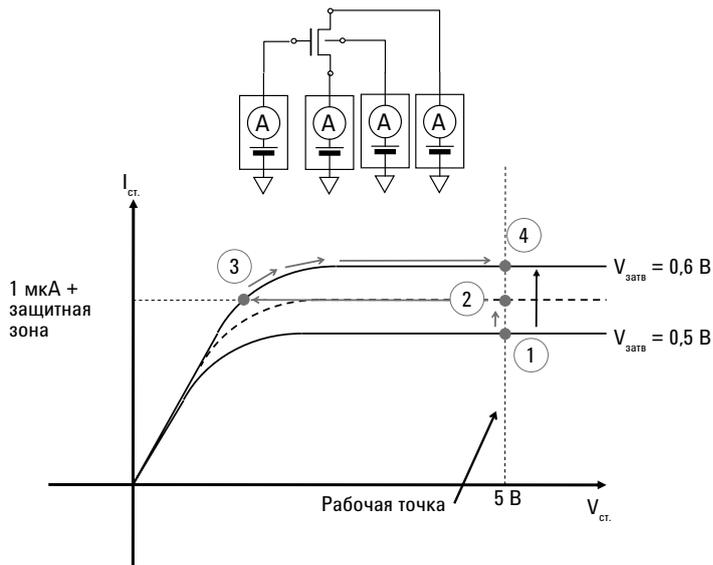
### Управление диапазоном измерений

Чтобы понять, зачем нужно управлять диапазоном и каковы особенности этого управления, мы должны сначала разобраться в вопросе соответствия диапазона выполняемой задаче. Ранее мы объяснили, что по мере перемещения между диапазонами, во внутренних цепях SMU подключаются и отключаются различные резисторы. Этот процесс занимает некоторое время и является частью нормальной работы SMU. Однако не было указано, что при переключении SMU в диапазон измерения, например, более слабых токов, выходные значения источника также временно понижаются до верхней границы диапазона измерения плюс защитная зона (около 10%). Это называется «ограничением по диапазону», чтобы отличать его от «ограничения по параметру» SMU, задаваемому пользователем. Очевидно, что «ограничение по диапазону» проявляется только при переходе, когда SMU нужен источник большего тока, чтобы перемещаться вверх в следующий диапазон измерения до тех пор, пока он либо сможет обеспечить необходимый ток, либо достигнет указанного пользователем уровня «ограничения по параметру» SMU.



**Рис.3.19.** «Ограничение по диапазону» ограничивает значение тока, которое SMU может выдавать в данном диапазоне измерений

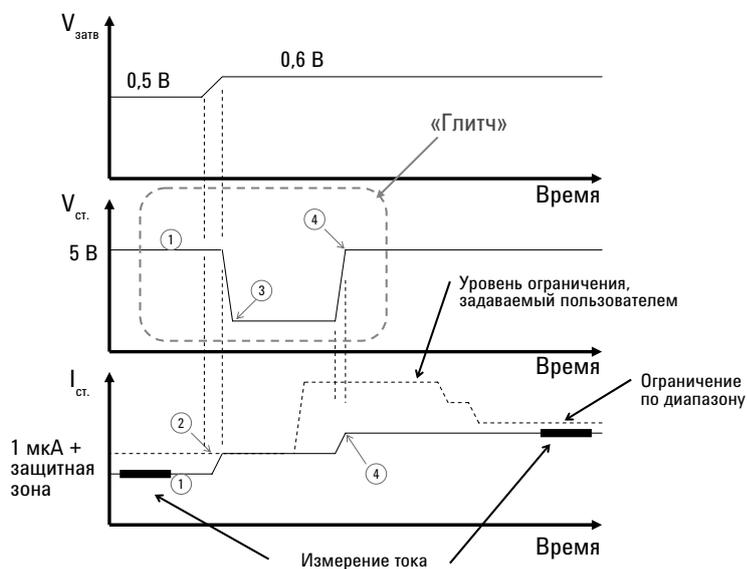
Чтобы понять, почему «ограничение по диапазону» может иногда иметь важное значение, обратимся к нижеприведенному рисунку.



**Рис.3.20.** Влияние «ограничение по диапазону» на выходное напряжение SMU

Предположим, что мы измеряем ВАХ ( $I_{ст.} - V_{ст.}$ ) показанную на рисунке выше, начиная с рабочей точки обозначенной «1» ( $V_{затв} = 0,5 \text{ В}$ ). Мы хотим перейти к рабочей точке «4» путем изменения напряжения на затворе до 0,6 В. Однако это действие требует перемещения вверх в следующий диапазон измерения. Поскольку изменение диапазона измерения происходит не мгновенно, то в процессе перемещения рабочей точки в положение «2» SMU не может обеспечить ток, необходимый для питания испытуемого устройства (ИУ). Это означает, что рабочая точка должна переместиться в положение, обозначенное цифрой «3». Когда SMU окончательно перейдет в следующий, более широкий диапазон измерения, он сможет вырабатывать ток, требуемый ИУ, а рабочая точка переместится в положение «4».

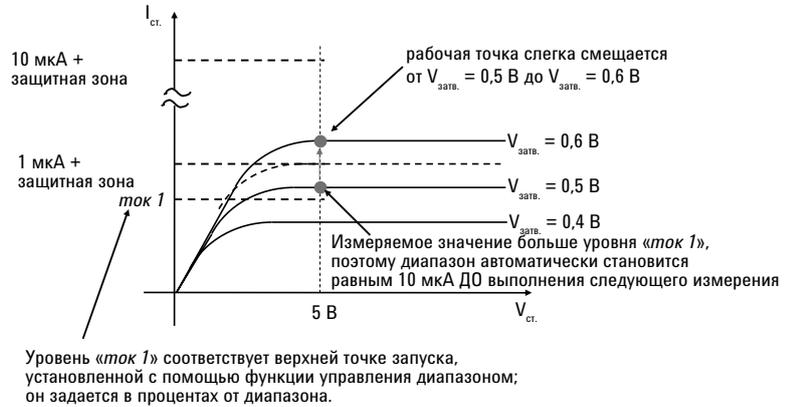
На экране осциллографа это будет выглядеть как глитч на осциллограмме напряжения SMU, хотя на самом деле напряжение на ИУ упало, поскольку SMU вырабатывает недостаточный ток.



**Рис.3.21.** Глитч напряжения на стоке полевого транзистора с МОП структурой, вызванный промежуточным состоянием «ограничения по диапазону»

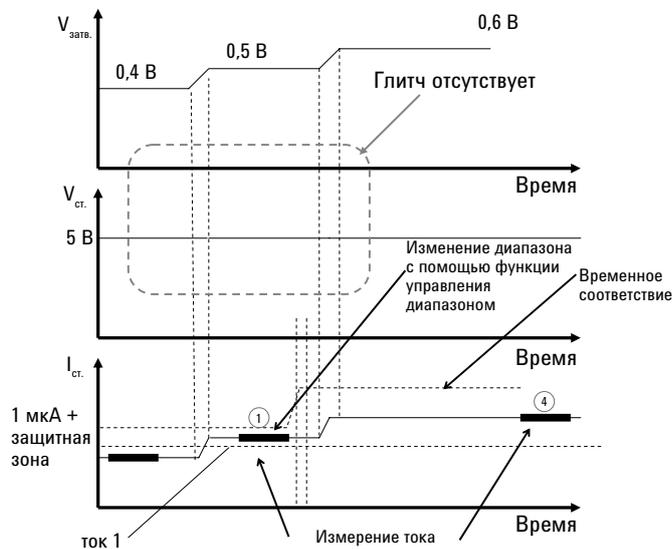
В подавляющем большинстве параметрических измерений «ограничение по диапазону» никогда не вызывает проблем. В самом деле, если бы мы просто не обсуждали этот вопрос, то, вероятно, Вы никогда бы не заподозрили, что они существуют. Однако в небольшом проценте случаев перепады напряжения, вызванные ИУ в связи с недостатком тока, могут оказать влияние на параметрические измерения и даже вызвать повреждение устройства (если перепад напряжения происходит на подложке и это заставляет устройство фиксировать состояние). До тех пор, пока не была разработана функция управления диапазоном, единственным решением этого вопроса была замена измерения со свипированием на выполнение серии точечных измерений. Замена свипирующего измерения серией точечных измерений всегда устраняет эту проблему, так как точечные измерения всегда начинаются в диапазоне измерения, содержащем заданное значение «ограничение по параметру» SMU и затем спускаются вниз к нужному диапазону измерения (избегая таким образом проблем с соблюдением «ограничение по диапазону»). Однако выполнение серии точечных измерений в таком режиме занимает гораздо больше времени, чем эквивалентные свипирующие измерения, что неприемлемо для большинства пользователей. Чтобы решить эту проблему, компания Agilent Technologies разработала (и запатентовала) функцию управления диапазоном.

Управление диапазоном можно рассматривать как своего рода функцию «предварительного определения диапазона». Функция управления диапазоном позволяет в пределах диапазона измерений (от 11 % до 99 %) установить точки запуска, которые заставляют SMU переходить вверх (или по желанию вниз) на новый диапазон измерения ДО того, как будет достигнут предел текущего диапазона измерений. Возможности функции управления диапазоном иллюстрирует следующий рисунок.



**Рис. 3.22.** Иллюстрация переключения SMU в следующий верхний диапазон измерений до достижения предела диапазона с помощью функции управления диапазоном

Применяя функцию управления диапазоном к ранее описанному случаю, можно обнаружить, что падение напряжения на стоке полевого транзистора с МОП структурой может быть полностью исключено.

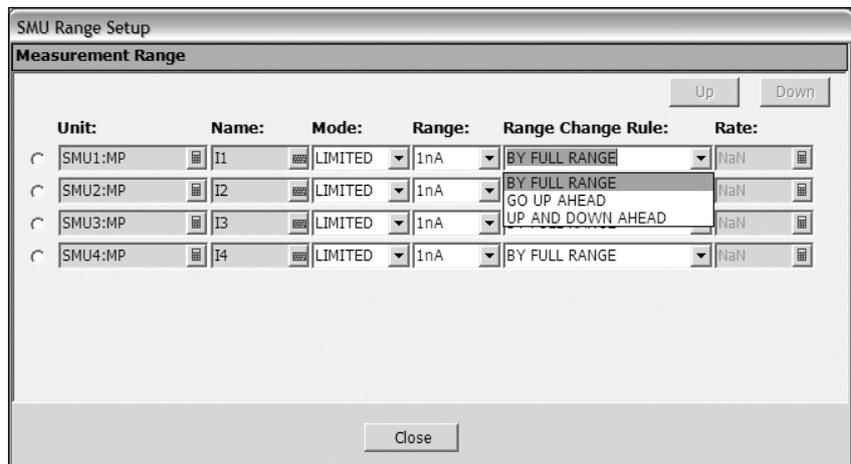


**Рис. 3.23.** Исключение влияния ограничения по диапазону с помощью функции управления диапазоном

Стоит поинтересоваться, а существуют какие-либо недостатки в использовании функции управления диапазоном? Ответ – «да», в том смысле, что если установлены слишком низкие пределы диапазона, то при переходе к более широкому диапазону можно понапрасну потерять точность измерений. Однако это небольшая возможная цена, которую нужно заплатить за то, чтобы «ограничение по диапазону» не вызывало регулярного повреждения устройства.

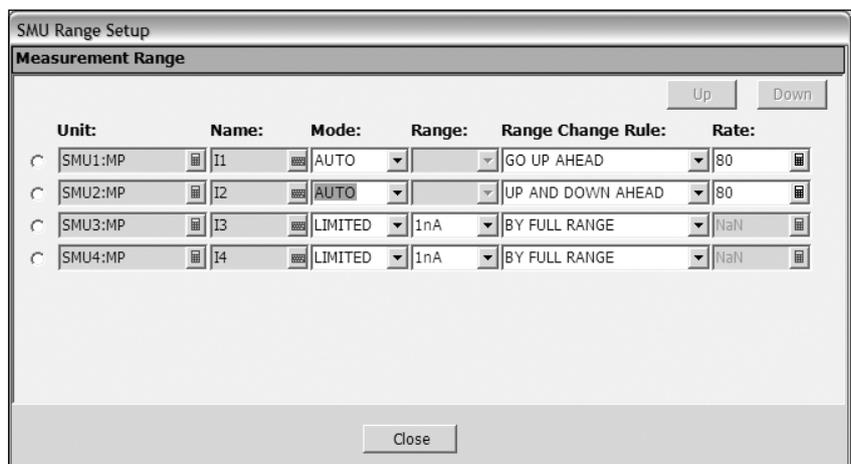
Должно быть очевидным, что появление глитчей напряжения SMU из-за недостаточного тока ИУ может быть вызвано многими факторами, в том числе диапазоном свипирования, выбранным шагом свипирования и изменениями характеристик ИУ. Таким образом, придется сделать несколько попыток, чтобы найти оптимальную точку запуска («ток 1»). Наконец, следует также отметить, что не все проблемы, вызывающие повреждения устройства и глитчи SMU, обусловлены вопросами «ограничения по диапазону», поэтому при их возникновении следует тщательно проверить все возможные причины.

Программное обеспечение Agilent EasyEXPERT поддерживает функцию управления диапазоном для приборов B1500A и B1505A в виде встроенного графического интерфейса пользователя (ГИП). Открыв окно настройки диапазона в режиме Classic Test (Классический тест), Вы можете изменить правило изменения диапазона, как показано ниже.



**Рис. 3.24.** Программное обеспечение Agilent EasyEXPERT позволяет активировать функцию управления диапазоном с помощью встроенного графического интерфейса пользователя (ГИП)

Можно выбрать вариант, при котором происходит переход только к вышерасположенному диапазону (“Go Up Ahead”) или разрешить переход и вверх и вниз (“Up And Down Ahead”). После того, как вы определили правило изменения диапазона, можно задать выбранный вами уровень в процентах от общего диапазона для перехода SMU к вышерасположенному диапазону (или к нижерасположенному, если выбран вариант “Up And Down Ahead”).



**Рис.3.25.** С помощью параметра “Rate” (Уровень) устанавливается значение уровня (в процентах от общего диапазона) для перехода SMU к вышерасположенному (или к нижерасположенному) диапазону

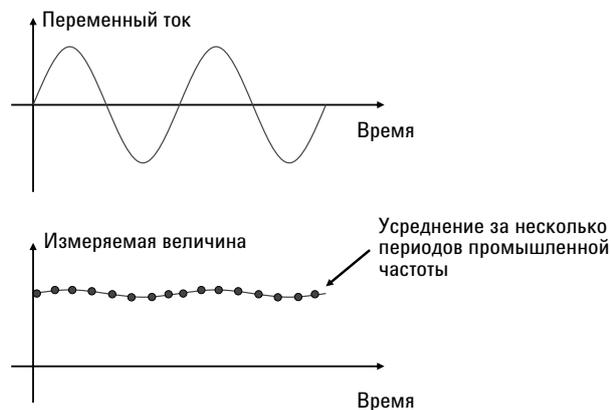
## Устранение шумов измерения и переходных процессов сигнала

### Время интегрирования

Неопытные пользователи иногда путают цели выбора диапазона измерения и время интегрирования. Важно понимать, что цель интегрирования измерения по времени – устранить шум. Увеличение времени интегрирования не дает того же эффекта, что и использование более чувствительного диапазона измерений.

Перед тем как увеличить время интегрирования, чтобы улучшить результаты измерений, сначала следует убедиться, что Вы выбрали правильный диапазон измерений для тех уровней тока или напряжения, которые пытаетесь измерить. Например, нет смысла пытаться провести измерения фемтоамперного тока с использованием режима ограничения диапазона SMU до 1 нА, поскольку SMU нужно перейти вниз, в диапазон 10 пА, чтобы правильно измерить фемтоамперный ток. Как правило, более узкие диапазоны измерений требуют более длительного интегрирования, чтобы получить приемлемое качество результата измерения, поскольку проблема шума становится более значимой, когда Вы пытаетесь измерить слабые токи и напряжения.

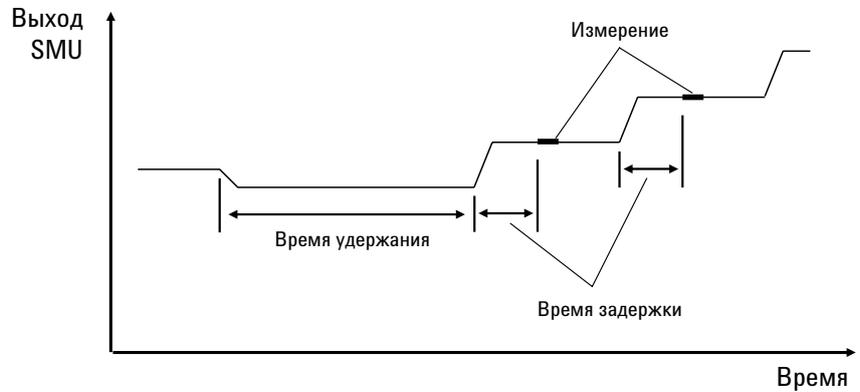
Терминология, используемая для времени интегрирования, не является одинаковой для всех изделий. В некоторых случаях термин «короткое» используется для обозначения любого времени интегрирования, заключенного внутри периода времени, который меньше периода колебаний промышленной частоты (PLC); термин «среднее» используется для обозначения интегрирования более одного периода; термин «длинное» используется для обозначения интегрирования в пределах нескольких PLC. В других случаях термины «автоматическое» и «ручное» используются для времени интегрирования меньше одного PLC, а «PLC» обозначает интегрирование в пределах одного или более PLC. Точная терминология указана в документации на конкретный прибор. Важно усвоить не ту или иную терминологию, а понять, когда нужно использовать каждый тип времени интегрирования.



**Рис.3.26.** Интегрирование в пределах одного периода промышленной частоты (PLC) устраняет ошибку измерений, вызванную наводкой от источника переменного тока, путем выборки за несколько периодов колебания частоты электросети и усреднения измерений

### *Время удержания и время задержки*

В дополнение к шуму, емкость на выходах SMU может вызвать дребезг и другие переходные явления каждый раз, когда SMU переходит к новым значениям напряжения или тока. Перед тем как проводить измерения, нужно задать время удержания и время задержки измерения, как показано ниже. Это позволяет дождаться стабилизации измеряемого напряжения или тока.



**Рис. 3.27.** *Настройки времени удержания и времени задержки позволяют задать время ожидания начала измерений после того, как SMU начнет выдавать новые значения тока или напряжения*

Время удержания гарантирует, что выходные параметры SMU будут стабильны к моменту начала измерения, а задержка — что выходные параметры SMU будут стабильны во время измерений, если выходное значение SMU изменяется.

## Измерения слабых токов

Выполнение измерений слабых токов с помощью SMU (в фемтоамперном или даже суб-фемтоамперном диапазоне) связано с множеством проблем. Но ни одна из этих проблем не является непреодолимой, все они могут быть решены с помощью хорошо отлаженных технологий измерений. Краткое изложение этих технологий представлено ниже.

- Обеспечение низкого уровня шума в зоне зондирования
  - Экранируйте зону выполнения измерений (клетка Фарадея)
  - Избавьтесь от источников электрических помех
- Устранение паразитных токов утечки
  - Используйте кабели и зонды с Guard-экраном (до наконечника зонда).
  - Используйте держатель полупроводниковых пластин с Guard-экраном.
- Правильный выбор настроек параметров измерений
  - Выберите правильный диапазон измерения, время интегрирования и время удержания
- Выполнение калибровки и установки смещения нуля SMU

Методы экранирования с помощью Guard- и Shield-экранов уже обсуждались в предыдущей главе, а методы измерения слабых токов на полупроводниковой пластине будут обсуждены в следующей главе. Однако есть одна функция SMU, имеющая важное значение для успешного измерения слабых токов, которая еще не обсуждалась – функция устранения смещения нуля.

### Устранение смещения нуля

Смещение нулевого уровня тока может вызвать довольно серьезные проблемы при измерении тока в фемтоамперном диапазоне. Существует множество источников смещения токов, но важно знать, что пока они существуют, их можно устранить. Во всех приборах 4155C, 4156C, B1500A и B1505A предусмотрена встроенная функция «Устранение смещения нуля». Когда к выходам SMU ничего не подключено, данная функция измеряет ток смещения SMU, а затем автоматически вычитает это смещение когда SMU выполняет измерения.

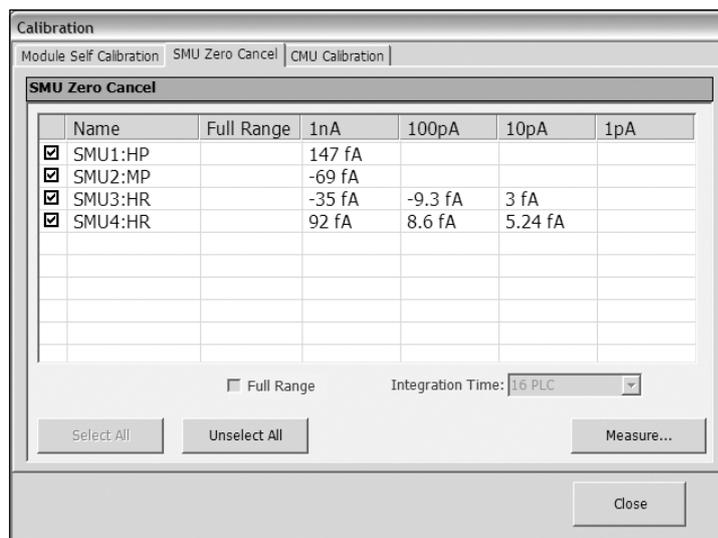
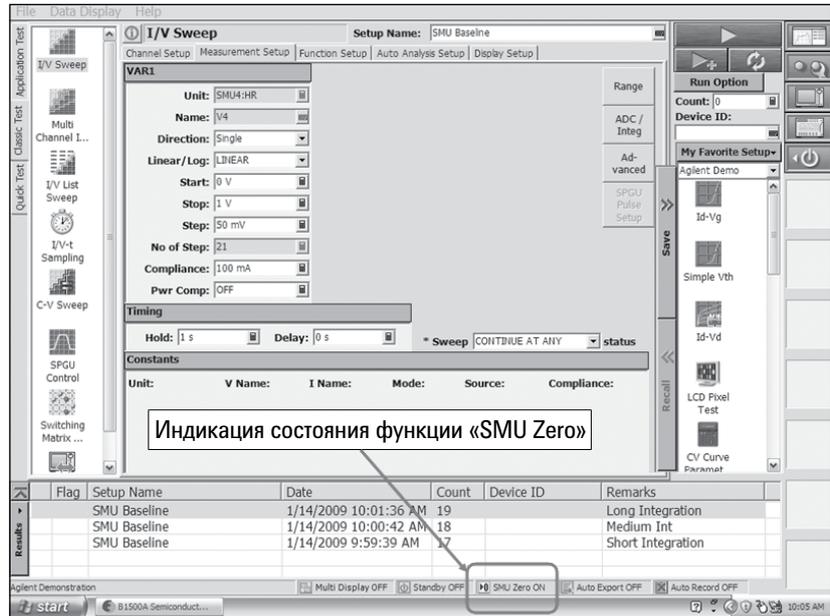


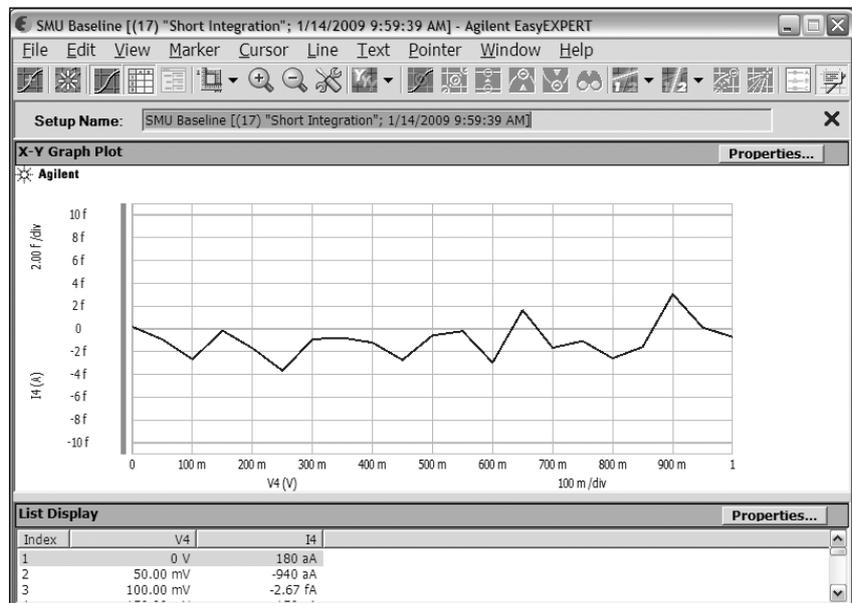
Рис. 3.28. Результаты выполнения калибровки функции устранения смещения нуля SMU

В приборах B1500A и B1505A состояние функции устранения смещения нуля SMU появляется в нижней строке меню, как показано ниже.



**Рис. 3.29.** Местоположение поля индикации состояния функции «Нулевой уровень SMU» (SMU Zero) в основном окне ПО EasyEXPERT

Выполнив калибровку функции устранения смещения нуля, вы получаете возможность измерять слабые токи с помощью HRSMU с неподключенными выходами с очень низким отклонением ( $\pm 3$  фА) от базовой линии. На следующей графике показаны результаты такого измерения на B1500A с «коротким» временем интегрирования.



**Рис. 3.30.** Базовая линия при измерении слабых токов с помощью SMU высокого разрешения (HRSMU) с коротким интегрированием. Видно, что отклонение от базовой линии составляет всего  $\pm 3$  фА.

### *Отладка процесса измерения слабых токов*

Отладка процесса измерения слабых токов не представляет сложности, если следовать описанной ниже логической процедуре. Данная последовательность отладки предполагает, что используются SMU высокого разрешения (HRSMU). Как упоминалось выше, нет никакого смысла пытаться проводить фемтоамперные измерения, если вам не доступен диапазон измерений, равный, по крайней мере, 10 пА. Если у вас возникли затруднения при выполнении слабых измерений, то соблюдение последовательности отладки позволит избежать проблем.

1. Выполните свипирование в пределах от 0 В до 1 В без подключенных кабелей (после 30-минутного прогрева)
  - а. Убедитесь, что все модули SMU прошли самокалибровку
  - б. Выполните процедуру устранения смещения нуля SMU
  - в. Убедитесь, что отклонение от базовой линии меняется в пределах 3 фА
  - г. **Примечание.** Если все в норме, то SMU функционируют правильно.
2. Подсоедините кабели зондовой станции к SMU, но не подсоединяйте их к зондовой станции
  - а. Подождите несколько минут, чтобы прекратилось влияние пьезоэффекта
  - б. Выполните процедуру устранения смещения нуля SMU
  - в. Проверьте базовую линию
  - г. **Примечание.** Если все в норме, значит кабели не повреждены (утечки отсутствуют).
3. Подсоедините кабели зондовой станции к панели разъемов станции, но не подключайте их к зондам
  - а. Подождите несколько минут, чтобы прекратилось влияние пьезоэффекта
  - б. Выполните процедуру устранения смещения нуля SMU
  - в. Проверьте базовую линию
  - г. **Примечание.** Если все в норме, то утечки через панель отсутствуют.
4. Подсоедините зонды станции к панели разъемов
  - а. Подождите несколько минут, чтобы прекратилось влияние пьезоэффекта
  - б. Держа зонды над пластиной, выполните процедуру устранения смещения нуля SMU
  - в. Держа зонды над пластиной, проверьте базовую линию
  - г. **Примечание.** Если все в норме, то зонды станции работают правильно.

Шум от линии электропитания, как правило, становится более заметным в диапазонах измерения слабых токов. Это означает, что возможно, потребуется интегрировать результаты слабых измерений за несколько периодов промышленной частоты, чтобы получить результаты, избавленные от этого шума. При выполнении субфемтоамперных измерений с помощью блока аттоамперных измерений (ASU), это может стать серьезной проблемой. Известен один случай, когда экспериментатору, измерявшему субфемтоамперные токи, ничего не оставалось делать, кроме того как проводить измерения в выходные, когда большая часть электрооборудования в здании, в котором он работал, была отключена.

## Точечные и свипирующие измерения

### *Сравнение точечных и свипирующих измерений*

При параметрическом тестировании выполняются два вида измерений: точечные и свипирующие. Точечное измерение проводится в одной точке, при этом результат получается в скалярном виде. Свипирующее измерение представляет собой серию измерений, при этом результат получается в векторном виде. В процессе свипирующего измерения меняется одна независимая переменная, проводится измерение зависимой переменной и полученные результаты отображаются на графике. Вначале может показаться, что свипирующее измерение – это просто серия точечных измерений, но на самом деле это не так. Чтобы ускорить выполнение свипирующего измерения, в алгоритме работы прибора заложены определенные допущения, связанные с переходами от одной точки измерения к другой при свипировании. Основное допущение состоит в том, что при переходе от одной точки измерения к другой не нужно менять диапазон измерения (в режиме ограниченного диапазона или с автоматическим выбором диапазона). Конечно, если при перемещении из одной точки свипирования в другую потребуется изменить диапазон измерения, то измерительная схема измерения позволит это сделать. Важным моментом является то, что в отличие от точечного измерения (которое всегда начинается в диапазоне «ограничения» и перемещается вниз к нужному диапазону измерения), свипирующее измерение пытается свести к минимуму ненужные изменения диапазона. Если принять такое допущение, то свипирующее измерение может быть выполнено значительно быстрее, чем аналогичный набор точечных измерений.

### *Первичные свипирующие измерения*

Для первичного свипирования необходимо указать три параметра: начальное значение, конечное значение и величина шага (суммарное количество шагов свипирования меняется в зависимости от расстояния между точками). Прибор начинает измерение с начального значения переменной свипирования, потом добавляет к ней значение, указанное в поле «шаг», и проводит измерение снова. Этот процесс увеличения значения на шаг и последующего измерения продолжается до тех пор, пока переменная свипирования не достигнет конечного значения. **Примечание.** В приборах 4145A/B первичная переменная свипирования обозначается VAR1 (для переменной #1), в приборах 4155C, 4156C и B1500A/B1505A (в классическом режиме) также используется подобная терминология для обеспечения единства обозначения.

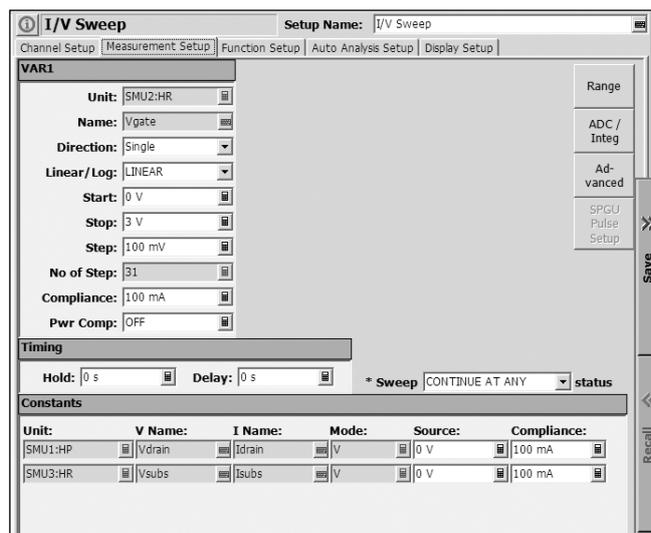


Рис. 3.31. Настройка свипирующего измерения в режиме классических испытаний

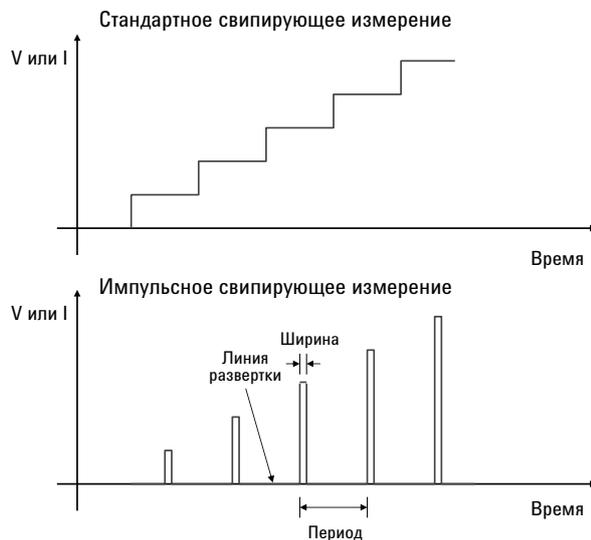
Кроме вышеупомянутых параметров, задаются направление и масштаб свипирования – линейный/логарифмический. Параметр «направление» позволяет

задать выполнение или только одного свипирования (от начального значения до конечного), или выполнение двойного свипирования (от начального значения до конечного, а затем назад – от конечного до начального). Параметр «линейный/логарифмический» позволяет задать шаг свипирования в линейном или логарифмическом масштабе. В случае логарифмического свипирования можно выбрать 10, 25 или 50 точек на декаду.

#### *Импульсные свипирующие измерения*

Как было упомянуто в предыдущем разделе, SMU могут выполнять импульсные измерения.

Минимальная длительность импульса для B1500A составляет 500 мкс, а максимальный период следования импульсов – 5 с (при минимальном коэффициенте заполнения 0,01 %). Обычно это больше, чем нужно для тестирования наиболее мощных устройств (по крайней мере для SMU высокой мощности, источник которого выдает до  $\pm 200$  В и до  $\pm 1$  А). HCSMU прибора B1505A вырабатывает импульс минимальной длительности 50 мкс (при 20 А), а максимальный период следования импульсов также составляет 5 с (при минимальном коэффициенте заполнения 0,001 %). Стандартное свипирующее измерение сравнивается с импульсным свипирующим измерением на рисунке ниже.



**Рис. 3.3.2.** При выполнении импульсного свипирующего измерения с помощью SMU можно устранить нагрев устройства

**Примечание.** SMU не способен вырабатывать импульсы с достаточно низким значением коэффициента заполнения для предотвращения разогрева транзисторов, изготовленных по технологии «кремний на изоляторе» (SOI), поскольку для этого требуются импульсы наносекундного диапазона. Методы измерения параметров таких устройств будут обсуждаться в главе 5.

Важно помнить, что перед выполнением импульсных измерений следует убедиться, что вы не задали никаких условий измерения, которые могли бы конфликтовать с настройками импульсов. Хотя этот вопрос будет рассмотрен более подробно в главе 5, где будут обсуждаться измерения, зависящие от времени, основное правило для SMU заключается в том, что точность важнее всех других параметров. Это означает, что при выполнении импульсных измерений очень маленьких значений необходимо задавать короткое время интегрирования и использовать фиксированный диапазон; в противном случае вы не получите заданную длительность импульса. Иными словами, SMU будет выдавать импульсы такой длительности, которая необходима для того, чтобы выполнить требования к времени интегрирования и/или к изменению диапазона, которые вы задали. Если для выполнения измерений используются приборы B1500A или B1505A,

то не нужно об этом заботиться, поскольку все согласуется автоматически; однако если вы используете более старые приборы (4155 или 4156), то необходимо все выставить вручную.

### Измерения с зависимым свипированием

Функция зависимого свипирования обеспечивает повторное обращение к первичной переменной свипирования каждый раз, когда увеличивается вторичная переменная свипирования. Для измерения с зависимым свипированием необходимо указать три дополнительных параметра: начальное значение, конечное значение и число шагов.

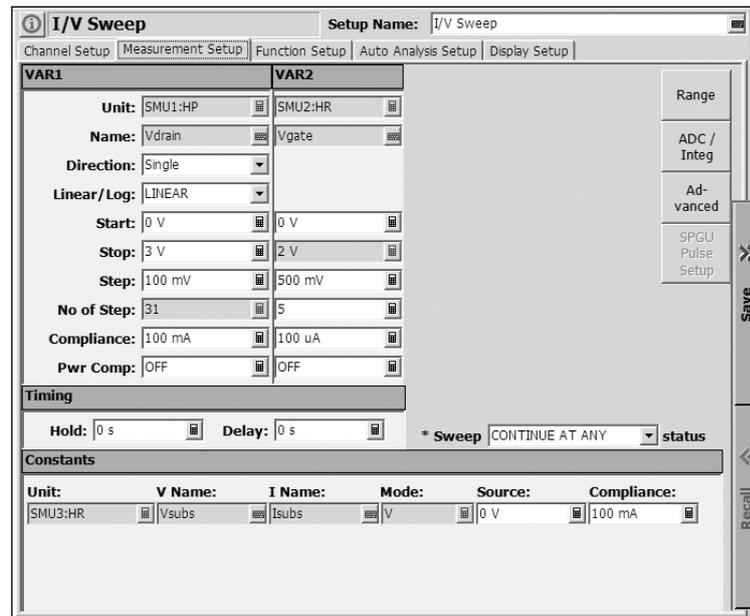


Рис. 3.33 Настройка зависимого свипирования в режиме классического теста

Прибор будет выполнять свипирующие измерения с переменной зависимого свипирования, начиная с начального значения, а затем переменная зависимого свипирования будет увеличена на ширину одного шага свипирования, после чего свипирующее измерение будет повторено. Процесс увеличения на ширину шага и повторения свипирующего измерения продолжается до тех пор, пока не будет выполнено указанное количество шагов. **Примечание.** В приборах 4145A/B эти переменные обозначаются как VAR2 (для переменной #2); в приборах 4155C, 4156C и B1500A/B1505A (в классическом режиме) также используются подобные последовательные обозначения.

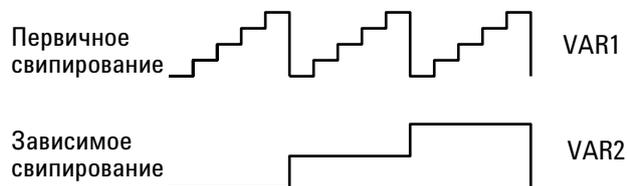
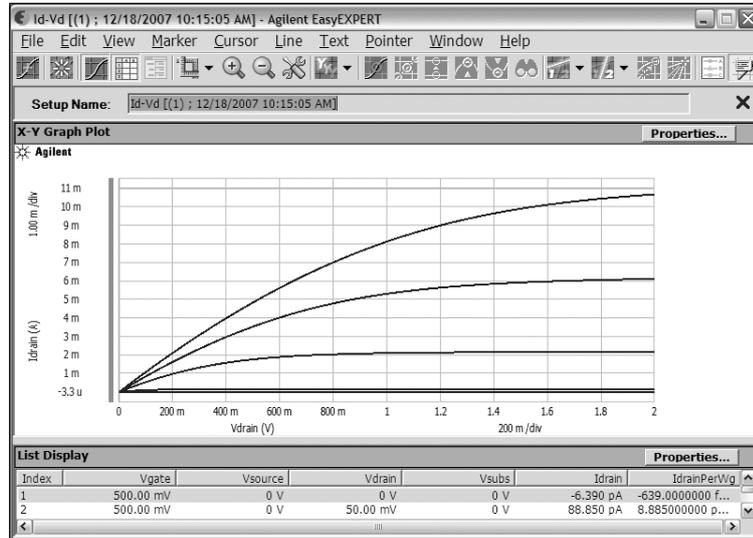


Рис. 3.34. Функция зависимого свипирования обеспечивает повторное обращение к первичной переменной свипирования SMU каждый раз, когда увеличивается зависимая переменная свипирования

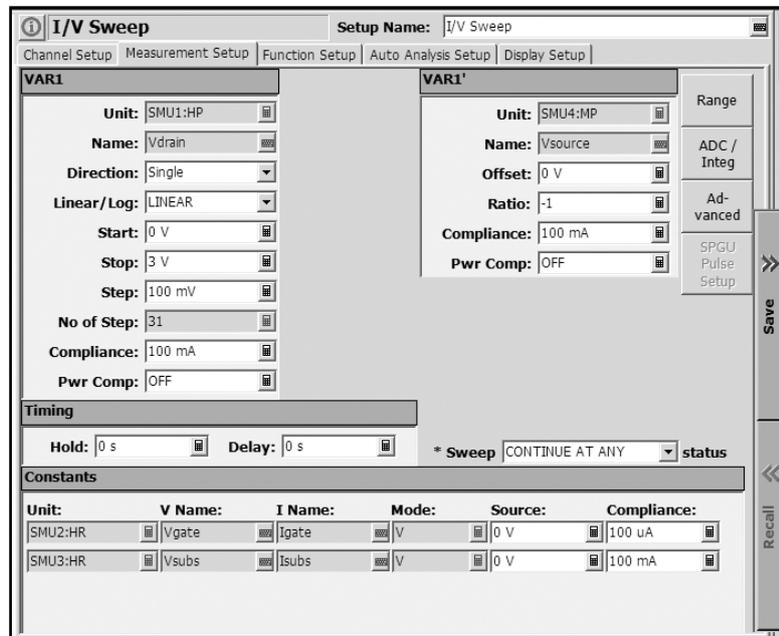
Функция зависимого свипирования полезна для получения семейства кривых, например, ВАХ транзисторов MOSFET (Ист.-Вст.) при изменении напряжения затвора в заданном диапазоне, как показано ниже.



**Рис. 3.35.** Функция зависимого свипирования может использоваться для получения семейства кривых Ист.-Вст.

#### Измерения с синхронным свипированием

Функция синхронного свипирования позволяет задать для одного SMU такой же режим свипирования, что и у первичного источника свипирования (другого SMU), но отличающийся коэффициентом, задаваемым пользователем. Для измерений с синхронным свипированием необходимо задавать два дополнительных параметра: коэффициент и значение смещения, как показано ниже.



**Рис. 3.36.** Функция синхронного свипирования позволяет одному SMU выполнять такое же свипирование, как другому SMU, но с коэффициентом, заданным пользователем

Прибор будет выполнять свипирующее измерение с синхронизированной переменной свипирования, отслеживающей первичную переменную свипирования (на контролируемом SMU), но с применением коэффициента. Параметр «смещение» позволяет задавать постоянное смещение синхронизированной переменной свипирования относительно первичной переменной свипирования. В приборах 4145A/B эта переменная обозначается как VAR1' («первичная» для первой переменной), в приборах 4155C, 4156C и B1500A/B1505A (в классическом режиме) также используются подобная терминология для обеспечения единства обозначения.

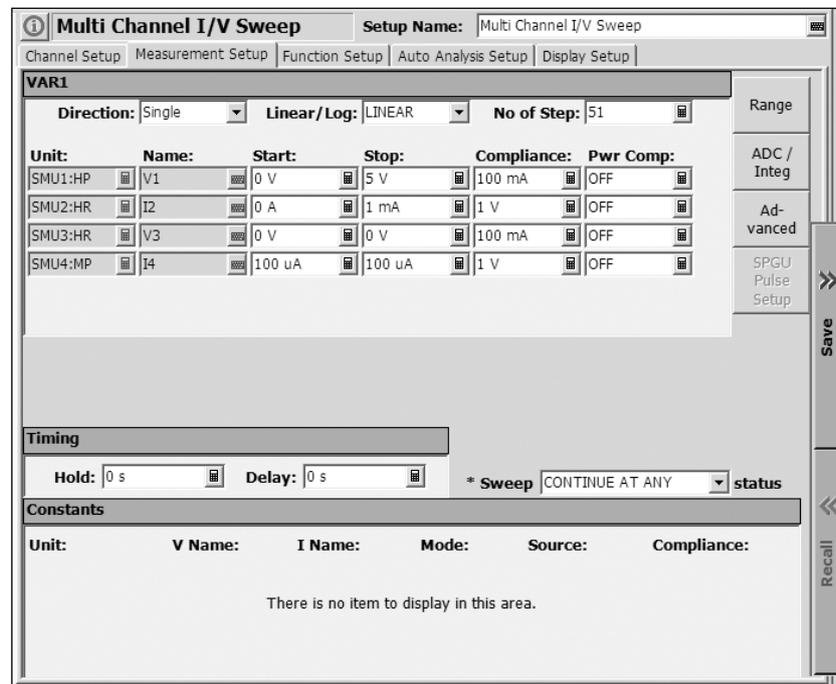


**Рис. 3.37.** Функция синхронного свипирования позволяет определенному SMU отслеживать первичный источник свипирования с учетом коэффициента, заданного пользователем

Хотя функция синхронного свипирования используется во многих случаях, отметим два важнейших ее применения: последовательное и параллельное соединение SMU (эти вопросы будут кратко обсуждены ниже).

### Измерения с многоканальным свипированием

Некоторые анализаторы (такие, как B1500A и B1505A) поддерживают истинные многоканальные свипирующие измерения. Ниже представлен пример использования функции измерения с многоканальным свипированием в приборе B1500A.



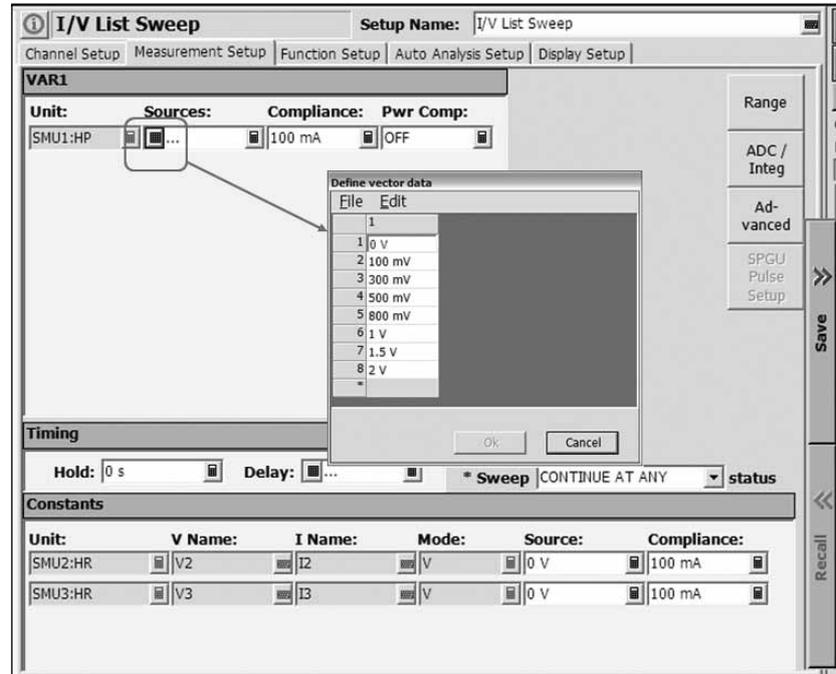
**Рис. 3.38.** Функция многоканального свипирования позволяет одновременно осуществлять свипирование всеми подключенными SMU

Основные особенности многоканального свипирования:

1. Для каждого источника можно выбрать, ЧТО он будет выдавать независимо от других источников: ток или напряжение.
2. Начальные и конечные значения свипирования для каждого источника свои, а число точек свипирования должно быть одинаковым для всех источников.
3. Вы можете задать одинаковые начальные и конечные значения, в результате на выходе источника будет поддерживаться постоянное значение (как это используется, будет объяснено позже).
4. Как и для стандартной функции свипирования, можно задать соответствие по мощности для каждого источника свипирования.
5. Поддерживается функция зависимого свипирования (VAR2), а функция синхронного свипирования не поддерживается (VAR1').

### Измерения со свипированием по списку

Анализаторы Agilent B1500A и B1505A поддерживают свипирование по списку. Эта функция позволяет проводить измерения в точках свипирования, заданных с помощью произвольного списка векторов, созданного в виде электронной таблицы. Ниже показан пример функции свипирования по списку в приборах B1500A/B1505A.



**Рис. 3.39.** Функция свипирования по списку позволяет задать точки свипирования в виде электронной таблицы, а не в виде линейной последовательности

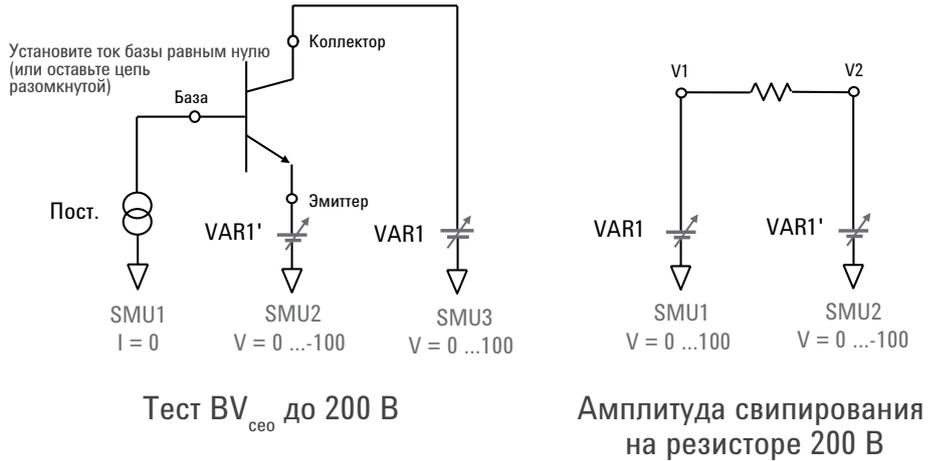
Функция свипирования по списку расширяет возможности базовой функции свипирования. Вместо вынужденного использования свипирования с постоянным шагом (либо в линейном масштабе, либо в логарифмическом), как в случае со стандартной функцией свипирования, свипирование по списку позволяет задавать эти точки совершенно произвольно. Одним из возможных применений этой функции является измерение субпороговых токов утечки транзисторов MOSFET, где можно задать начальные значения свипирования напряжения на затворе очень близко друг к другу, а затем раздвинуть их дальше друг от друга после того, как будет пройдена область субпороговой утечки. Вы можете создать список векторов, например в MS Excel, и затем вырезать и вставить их в векторные данные EasyEXPERT. Программные инструменты ПО EasyEXPERT позволяют вставить имя векторной переменной в качестве «источника» для свипирования по списку.

## Параллельное и последовательное соединение SMU

Для получения более высоких значений напряжения и тока, чем может выдать один SMU, используется последовательное или параллельное соединение SMU. Однако методика соединения не всегда проста и очевидна.

### Последовательное соединение SMU

Хотя SMU являются устройствами с одним выводом (другой вывод всегда привязан к земле), используя один SMU, отслеживающий другой SMU с помощью функции синхронного свипирования (VAR1'), можно удвоить напряжение, подаваемое на ИУ (так же, как если бы SMU были на самом деле соединены последовательно). Рисунок ниже показывает, как это можно сделать.

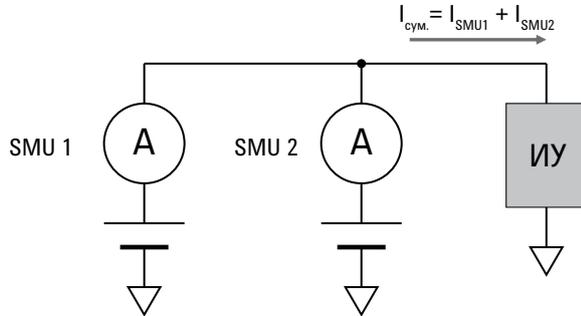


**Рис. 3.40.** Использование функции VAR1' фактически позволяет соединить SMU последовательно.

Хотя этот пример приведен для SMU средней мощности и SMU высокого разрешения (их максимальное напряжение на выходе составляет  $\pm 100$  В), в SMU высокой мощности (максимальное напряжение которых составляет  $\pm 200$  В), можно получить дифференциальные напряжения до 400 В.

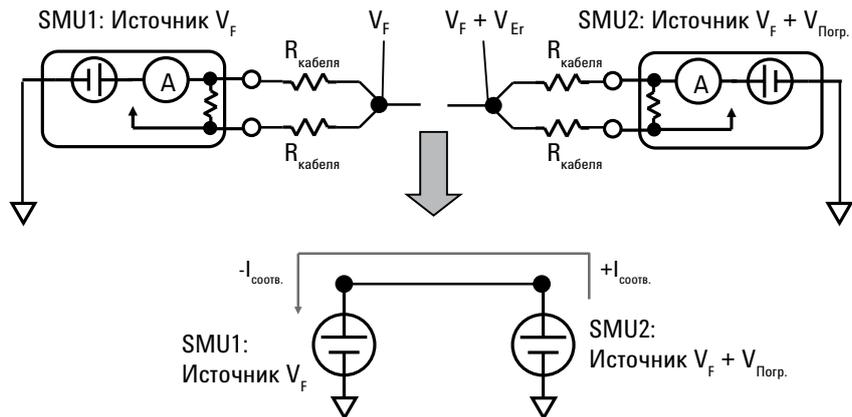
### Параллельное соединение SMU

Параллельное соединение SMU в режиме генерации тока – относительно простая задача, полезность которой довольно ограниченная. В большинстве случаев нам нужен источник напряжения, а параллельное соединение SMU мы выполняем в целях увеличения тока, подаваемого от источника напряжения, как показано ниже.



**Рис.3.41.** Включив два SMU параллельно в режиме генерации напряжения, мы можем увеличить суммарный ток

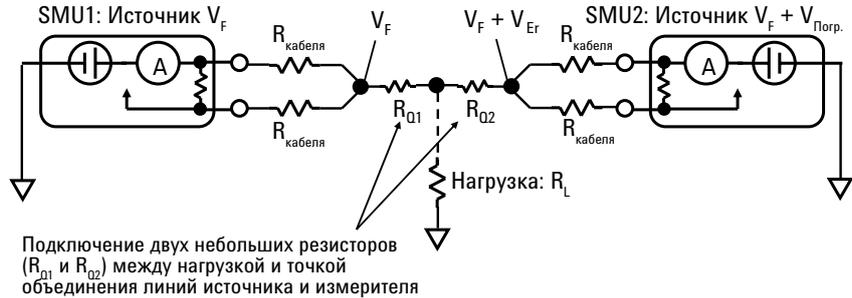
Рассмотрим общий случай параллельного соединения двух SMU в режиме генерации напряжения для измерений по четырехпроводной схеме.



**Рис.3.42.** При параллельном соединении SMU даже небольшая разница генерируемых напряжений (из-за погрешности) может привести к тому, что в одном или обоих SMU будет превышен предел соответствия по току

Проблема заключается в том, что даже если вы задаете одинаковые напряжения для обоих SMU, на практике существует некоторая погрешность установки напряжения на каждом SMU. Это приведет к тому, что один SMU станет источником тока для другого SMU и очень быстро один или оба SMU достигнут предела ограничения по току.

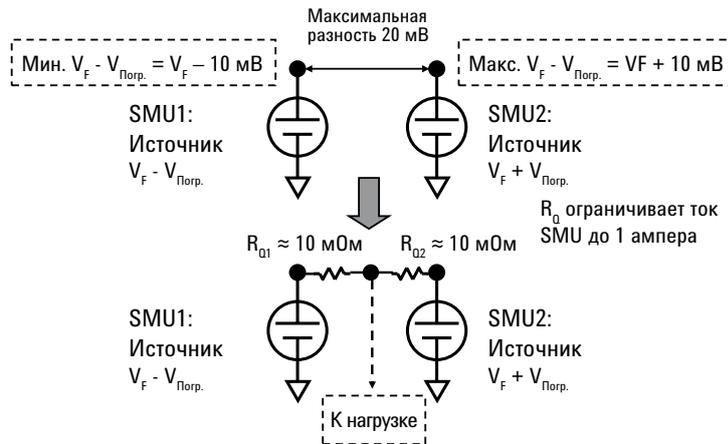
Избежать такой ситуации можно с помощью «квазичетырехпроводной схемы» с использованием двух резисторов небольшого номинала. Эти резисторы ограничивают ток, чтобы предохранить SMU от достижения уровня соответствия.



**Рис. 3.43.** Подключив два небольших резистора между нагрузкой и точкой объединения линий источника и измерителя, можно предохранить SMU от достижения уровня соответствия

Наихудший случай – когда два SMU высокой мощности соединены параллельно при выходном токе 1 А. Мы знаем, что максимальный диапазон измерения, в котором можно получить выходной ток 1 А, составляет 20 В, и что в этом диапазоне измерения максимальная погрешность генерируемого напряжения равна 10 мВ.

Макс. погрешность напряжения источника в диапазоне 20 В:  $\pm 0,03\% \times 20 \text{ В} + 4 \text{ мВ} = \pm 10 \text{ мВ}$



**Рис. 3.44.** Вычисление требуемого номинала резисторов для «квазичетырехпроводной» схемы, исходя из характеристик SMU

В результате вычислений получаем, что значения  $R_Q = 10 \text{ МОм}$  достаточно для компенсации погрешности 10 мВ в каждом SMU. Во многих случаях в качестве резистора 10 МОм можно использовать небольшой отрезок провода.



**Рис. 3.45.** Простой способ получить резистор 10 МОм – использовать небольшой отрезок провода

## Вопросы безопасности

Даже SMU средней мощности могут выдавать напряжения и токи, способные привести к летальному исходу. Поэтому очень важно понимать, какие меры предосторожности следует соблюдать для обеспечения безопасного выполнения параметрических измерений.

### Блокировка

Для предотвращения случайного поражения электрическим током все параметрические анализаторы Agilent снабжены блокировочным разъемом на задней панели. Пока блокировка не снята, прибор не может генерировать напряжение более 42 В. Местоположение блокировочного разъема на приборе B1500A (и B1505A) показано ниже.



**Рис. 3.46.** Расположение защитной блокировки на задней панели B1500A

Чтобы SMU выработывал напряжение более 42 В, необходимо соединить контакты 1 и 2 блокировочного разъема. **КАТЕГОРИЧЕСКИ ЗАПРЕЩАЕТСЯ СОЕДИНЯТЬ ЭТИ КОНТАКТЫ ПЕРЕМЫЧКОЙ, ТАК КАК ВОЗНИКНЕТ КРАЙНЕ ОПАСНАЯ СИТУАЦИЯ.** Для подключения к этому разъему следует использовать только специальные блокировочные кабели и оборудование, предназначенное для работы с такими кабелями.

Если предполагается использовать анализатор для параметрического тестирования вместе с полуавтоматической зондовой станцией, то следует проконсультироваться с поставщиком вашей станции, для выбора надлежащих аксессуаров, обеспечивающих работу схемы защитной блокировки. Все основные производители полуавтоматических зондовых станций могут поставлять решения, совместимые с этой схемой. Кроме того, если вы хотите тестировать корпусные устройства при выходном токе источника до 1 А и напряжении до 200 В, то для этой цели Agilent Technologies поставляет тестовую оснастку 16442В. К оснастке 16442В можно подключить кабель защитной блокировки Agilent 16493J, который позволяет держать крышку 16442В закрытой при напряжении источника более 42 В. Данная тестовая оснастка показана ниже.



**Рис. 3.47.** Тестовая оснастка Agilent 16442В поддерживает различные типы гнезд для тестирования устройств в корпусе и снабжена встроенной защитной блокировкой

Компания Agilent также поставляет тестовую оснастку, выдерживающую значительные токи и напряжения для использования с анализатором мощных электронных приборов/характериографом В1505А. Тестовая оснастка стандартной комплектации позволяет испытывать компоненты током до 20 А и напряжением до 3000 В.



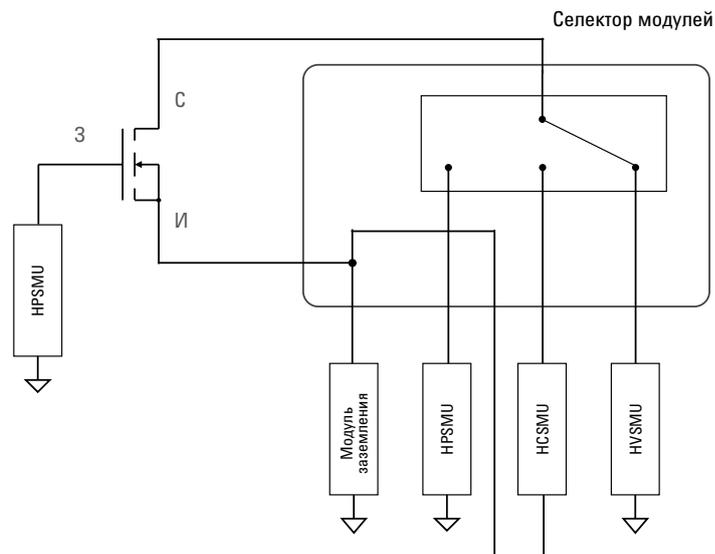
**Рис. 3.48.** Тестовая оснастка Agilent N1259А – безопасное решение для тестирования мощных устройств током до 20 А и напряжением до 3000 В

Оснастка N1259А имеет модульную конструкцию, поддерживающую различные типы корпусов, включая модули универсальных гнезд и гнезд для плат РТФЕ. N1259А также имеет защитную блокировку, предотвращающую выполнение измерений с открытой крышкой при опасных напряжениях.

## Селектор модулей (B1505A)

### Обзор

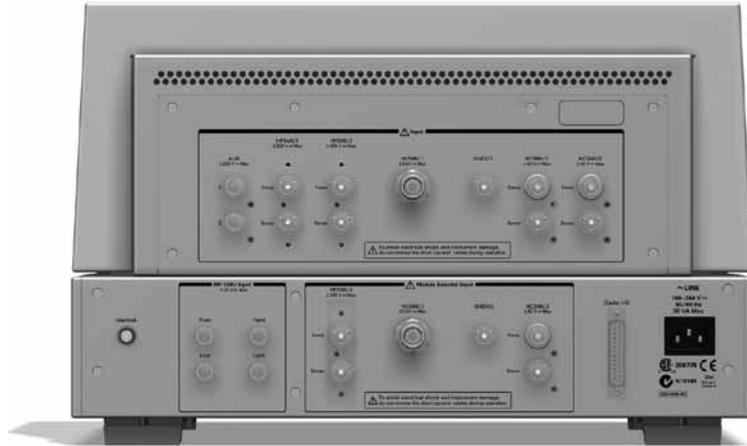
Анализатор B1505A поддерживает высоковольтный SMU (HVSMU) и до двух сильноточных SMU (HCSMU). Модуль HVSMU снабжен высоковольтным триаксиальным выходом, а модуль HCSMU обладает уникальной конфигурацией, включающей триаксиальный и выходы BNC (рассмотренные в этой главе ранее). А в SMU высокой мощности (HPSMU) предусмотрены два стандартных триаксиальных выхода (источника и измерителя). Несовместимость между этими тремя модулями может привести к утомительным переключениям кабелей между устройствами для измерений высокого напряжения, сильных токов и слабых токов. Чтобы решить эту проблему и облегчить переключения между различными модулями, Agilent предлагает селектор модулей, схема которого показана ниже.



**Рис.3.49.** Селектор модулей позволяет переключаться между стандартными, высоковольтными и сильноточными измерениями без смены кабелей

Селектор модулей подключается к анализатору B1505A через цифровой интерфейс ввода/вывода, а программное обеспечение EasyEXPERT для B1505A автоматически управляет правильным подключением измерительной аппаратуры.

Селектор модулей поставляется в двух исполнениях: для использования с тестовой оснасткой N1259A и для использования с зондовой станцией. Исполнение для тестирования корпусных устройств (N1259A-300) устанавливается под тестовой оснасткой N1259A, как показано ниже.



**Рис. 3.50.** Силовая тестовая оснастка N1259A устанавливается над селектором модулей N1259A-300 для тестирования устройств в корпусе

Такая конфигурация позволяет переключаться между измерениями высоких напряжений и сильных токов для корпусных устройств без необходимости заменять приборы или кабели. Селектор модулей, используемый совместно с зондовой станцией, имеет ряд отличий и другой каталожный номер (N1258A). В нем предусмотрены два высоковольтных триаксиальных выхода (источника и измерителя высокого уровня) и два выхода BNC (источника и измерителя низкого уровня). Кабели и адаптеры, необходимые для подключения N1258A к зондовой станции для силовой электроники будут описаны в главе 4 при рассмотрении параметрических измерений на полупроводниковой пластине.



## Глава 4. Параметрические измерения на полупроводниковой пластине

*Чтобы что-то узнать, нужно это попробовать, ибо, хотя вы думаете, что знаете это, у вас не будет никакой уверенности, пока сами не попробуете.*

Софокл

### Введение

подавляющее большинство параметрических измерений выполняется на полупроводниковой пластине. Очевидно, это означает, что для проведения измерений требуется зондовая станция. На результаты измерений оказывают сильное влияние различные устройства и принадлежности – держатели пластин, кабели и матричный коммутатор (если используется). Это часто упускается из виду многими инженерами, выполняющими параметрические измерения на полупроводниковой пластине.

#### *Сравнение полностью автоматизированных и исследовательских зондовых станций*

Полностью автоматизированные зондовые станции предназначены для использования в производственной среде совместно с оборудованием для параметрического или функционального тестирования. Полностью автоматизированные зондовые станции могут автоматически тестировать все пластины, загруженные в унифицированный контейнер для перевозки и хранения пластин (FOUP), и способны автоматически загружать и выравнивать тестируемые пластины. Полностью автоматизированные зондовые станции практически всегда используются с проб-картой и матричным коммутатором определенного типа. По причине своих габаритов, стоимости и сложности, полностью автоматизированные зондовые станции используются практически только для производственных испытаний совместно с производственными тестерами с высокой пропускной способностью. Поскольку этот справочник ориентирован на параметрические измерения для решения, в первую очередь, исследовательских задач, мы не будем отвлекаться на обсуждение автоматических зондовых станций.

Исследовательские зондовые станции предназначены для использования в лабораторных условиях и выпускаются в ручном и полуавтоматическом исполнении. Ручные зондовые станции не имеют шаговых электрических двигателей для автоматизации выравнивания какой-либо части пластины и перемещений с заданным интервалом. Вместо этого (как следует из их названия) их следует регулировать вручную всякий раз, когда нужно переместить зонд на другую часть пластины. В отличие от них, большинство полуавтоматических зондовых станций обладают способностью автоматически выравнивать отдельную пластину; однако они, как правило, не поддерживают автоматизированную загрузку пластин и требуют ручной установки каждой пластины. Полуавтоматические зондовые станции можно использовать с проб-картами и матричными коммутаторами, но чаще они применяются совместно с несколькими отдельными позиционерами (зондами) для максимальной гибкости измерений. Большинство полуавтоматических зондовых станций в сочетании с параметрическими измерительными приборами также позволяют проводить автоматическое тестирование всей пластины.



**Рис. 4.1.** *Различные типы полуавтоматических зондовых станций*

## Сложности измерений с помощью зондовой станции

Очевидно, что на качество параметрических измерений, выполняемых зондовой станцией, сильно влияют условия окружающей среды. К сожалению, зачастую это влияние неадекватно учитывается пользователями, пытающимися проводить такие измерения. Выделим некоторые из основных проблем.

1. Уровень собственных шумов – ненадлежащее экранирование зондовой станции значительно увеличивает уровень шумов при измерениях.
2. Снижение скорости измерений – паразитная емкость и пьезоэлектрические эффекты могут существенно уменьшить скорость проведения параметрических измерений.
3. Измерения при пониженной или повышенной температуре – низкая и высокая температура при измерениях создают проблемы, связанные с повышенной влажностью и электрическим шумом.

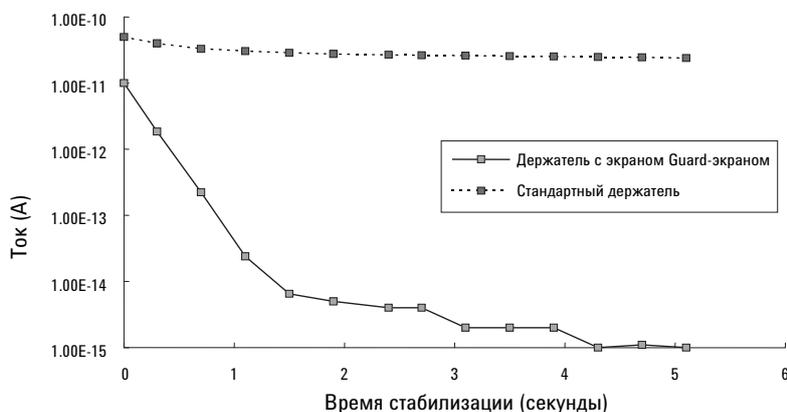
### Экранирование держателя пластин

Рассмотренные в главе 2 основные правила экранирования измерительного тракта имеют большое значение для проведения точных и достоверных измерений с помощью зондовой станции. Важно понять, что держатель полупроводниковой пластины представляет собой конденсатор чрезвычайно большой емкости, и что он может также действовать как большая антенна (принимающая фоновый шум). Следовательно, оптимальное качество измерений достигается при подключении экранированного держателя пластин по четырехпроводной схеме Кельвина, как показано ниже.



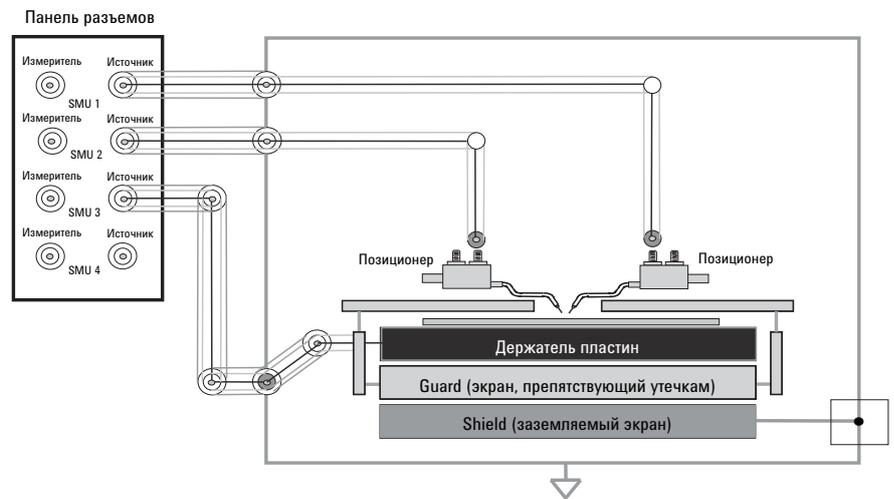
**Рис. 4.2.** Подключенный по четырехпроводной схеме Кельвина держатель пластин со слоем Guard-экрана позволяет исключить влияние собственной паразитной емкости и существенно снизить емкостной ток утечки через внешнюю среду

Влияние паразитной емкости держателя и токов утечки через держатель пластины может быть практически устранено с помощью Guard-экрана. Ниже представлены графические характеристики времени стабилизации держателя пластин с использованием и без использования Guard-экрана. Очевидно, что для держателя с Guard-экраном необходимое время ожидания перед началом измерений может быть значительно уменьшено.



**Рис. 4.3.** Графические характеристики времени стабилизации держателя пластин с и без (в стандартном исполнении) Guard-экрана

Если Guard-экран применить не только на держателе пластин, но и над измеряемой пластиной, то помехи будут подавляться еще сильнее и измерения будут проводиться при гарантированно низком уровне шума. Такая схема измерения показана ниже.



**Рис. 4.4.** Полностью экранированная измерительная среда зондовой станции (Примечание. Приведенная схема основана на запатентованной технологии AttoGuard® компании Cascade Microtech)

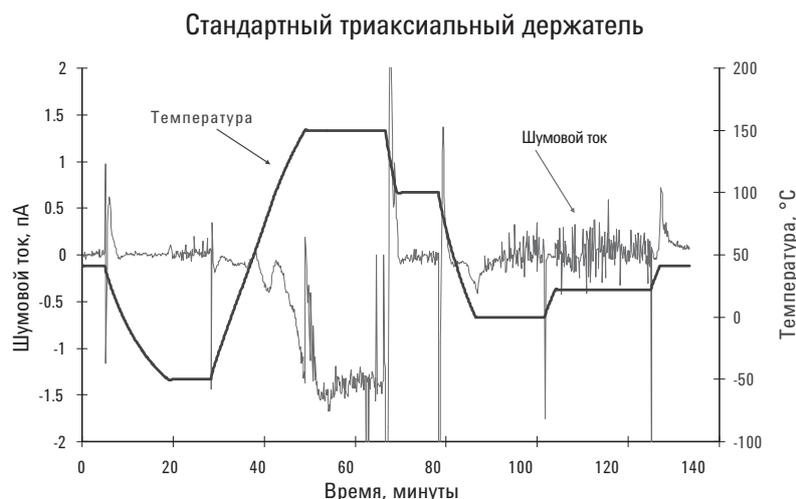
#### Сложности измерений при низких и высоких температурах

При выполнении параметрических измерений на полупроводниковой пластине при низких и высоких температурах возникают следующие сложности.

1. Высокий уровень электрических помех, генерируемых схемой терморегулирования.
2. Замедление процесса измерения из-за паразитной емкости.
3. Значительные помехи из-за переходных процессов, вызванных перемещением держателя пластин.
4. Образование инея из-за конденсации.

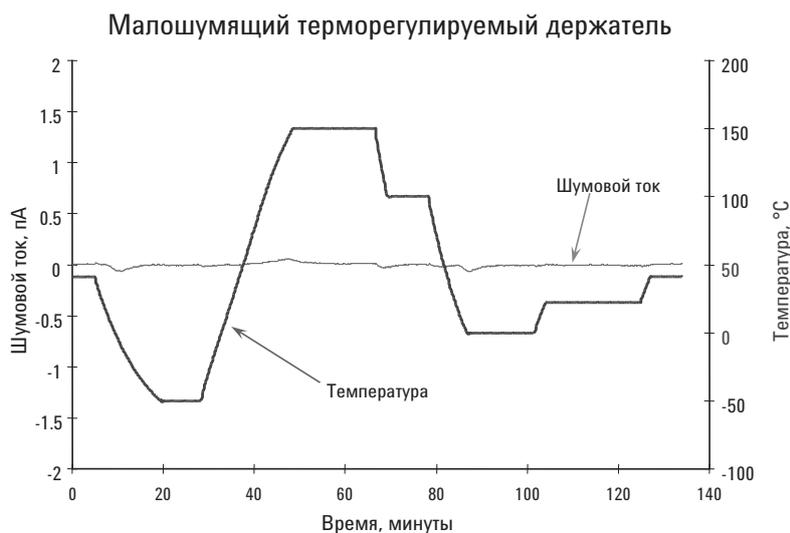
Рассмотрим каждую из этих проблем по очереди.

Возможно, что электрические помехи, генерируемые схемой терморегулирования, являются единственным основным источником ошибок измерений при низкоуровневых измерениях на пластине. Хотя полностью устранить влияние этой схемы невозможно, многие производители полуавтоматических исследовательских зондовых станций значительно его уменьшили. На представленном ниже рисунке показана зависимость шумового тока в схеме со стандартным триаксиальным держателем пластин от изменения температуры в течение времени.



**Рис. 4.5.** Шумовой ток стандартного триаксиального держателя пластин при изменении температуры в течение времени

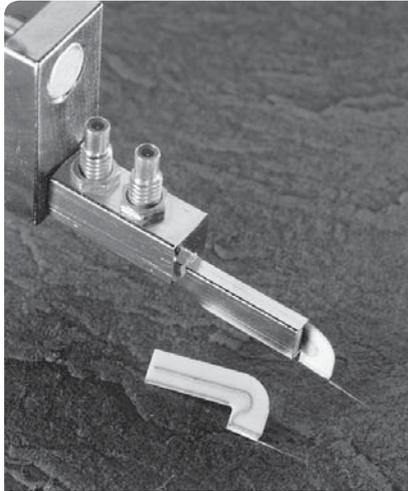
Для сравнения на следующем графике показан шумовой ток для держателя пластин с правильно спроектированной схемой терморегулирования.



**Рис. 4.6.** Шумовой ток держателя пластин с правильно спроектированной схемой терморегулирования

В конце концов, вы получаете то, за что платите, поэтому не имеет смысла пытаться проводить низкоуровневые измерения при высоких или низких температурах на чем-нибудь другом, кроме держателя пластин, специально предназначенного для этой цели. Перед покупкой любой полуавтоматической зондовой станции с терморегулируемым держателем пластин следует очень внимательно оценить его шумовые характеристики при измерении слабых токов, с целью убедиться в его соответствии вашим требованиям к параметрическим измерениям.

Кроме того, чтобы уменьшить электрические шумы держателя пластин, важно понизить шумы и емкостные утечки, вызванные зондами. Лучшим решением для измерений на полупроводниковой пластине при высоких температурах являются зонды с плоским керамическим наконечником. Такой наконечник легко выдерживает температуру до 300 градусов Цельсия и обладает минимальной остаточной емкостью. Позиционер с установленным на нем зондом с плоским керамическим наконечником показан на рисунке ниже.



**Рис. 4.7.** Зонды с плоским керамическим наконечником – лучшее решение для выполнения измерений на пластине при высокой температуре (Примечание. Фото предоставлено компанией Cascade Microtech)

Отметим, что наконечники данного типа легко заменяются при повреждении.

Аналогичным способом реализуется схема с проб-картой (она будет обсуждена ниже в данной главе). Однако в случае с проб-картой, близкое размещение множества сигнальных линий усложняет разработку. Выход в состоит том, чтобы экранировать всю проб-карту металлической оболочкой для максимальной изоляции сигнальных линий от воздействия теплового шума. Ниже показан пример полностью экранированной керамической проб-карты для измерений при высокой температуре.



**Рис. 4.8.** Полностью экранированная керамическая плоская зонд-карта работает при температуре от  $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Примечание. Фотография зонд-карты Attofast™ компании Cascade Microtech)

Электронные схемы и соединительные кабели, используемые в полуавтоматической зондовой станции для перемещения держателя пластин и контроля его температуры, заметно влияют на качество измерений с низким уровнем шумов. Это влияние усиливается при повышении температуры. Не существует единого рецепта, следуя которому можно полностью устранить источники этих шумов, но их влияние можно смягчить, используя перечисленные ниже «железные» правила проектирования:

1. Использование материалов с низким трибоэлектрическим эффектом, чтобы свести к минимуму величину электронного заряда, возникающего из-за трения.
2. Использование материалов с низкой диэлектрической проницаемостью для минимизации остаточного емкостного заряда.
3. Обеспечение низкого уровня шума за счет надлежащего экранирования.

Заключительная проблема связана с параметрическими измерениями на пластинах при низких температурах. Она заключается в образовании инея при прохождении точки росы. Влага значительно ухудшает точность параметрических измерений, поскольку она может привести к появлению высокой остаточной емкости, повышенным токам утечки и увеличению шума. По этой причине часто рекомендуется прогревать держатель пластины в течение двадцати четырех часов при +200 °C перед проведением температурных параметрических измерений. В любом случае, чтобы избежать образования инея при низкотемпературных измерениях, требуются циркуляция газовой среды (используется очищенный сухой воздух или азот). Однако на представленном ниже графике видно, что при увеличении расхода воздуха увеличивается уровень шумов.



**Рис. 4.9.** Влияние расхода воздуха на шум

Таким образом, самые лучшие зондовые станции могут обеспечить работу без образования инея при температуре -55 °C и минимальном расходе воздуха.

**Примечание.** Для большинства измерений обычно достаточно расхода воздуха менее 1 стандартного кубического фута в минуту (SCFM).

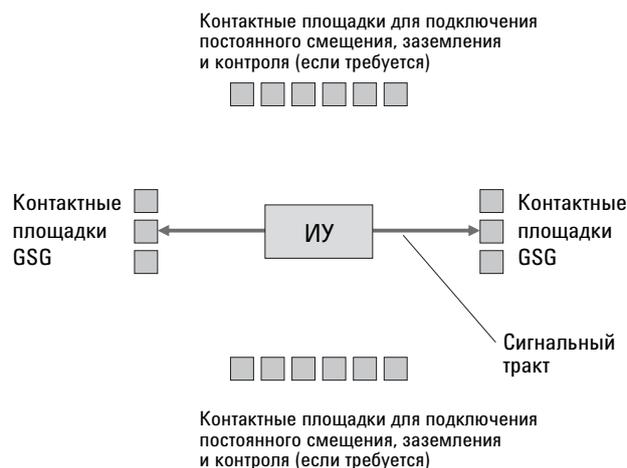
### Зондовые станции для измерений по постоянному току и в ВЧ диапазоне

Для полуавтоматических исследовательских зондовых станций существует два типа позиционеров: постоянного тока и высокочастотные (ВЧ). Многие полагают, что ВЧ зонды требуются только для измерений на высоких частотах гигагерцового диапазона (например, для получения S-параметров), но это не так. ВЧ зонды могут потребоваться, чтобы добиться удовлетворительных результатов измерения емкости на частотах более 5 МГц. Кроме того, ВЧ зонды нужны при многих высокоскоростных импульсных измерениях, чтобы избежать дребезга на фронтах импульса. Поэтому очень важно понимать различия между ВЧ зондами и зондами постоянного тока, а также ограничения, связанные с их использованием.

Ниже указан ряд ключевых моментов, которые следует учитывать при разработке тестовых структур для ВЧ зондов.

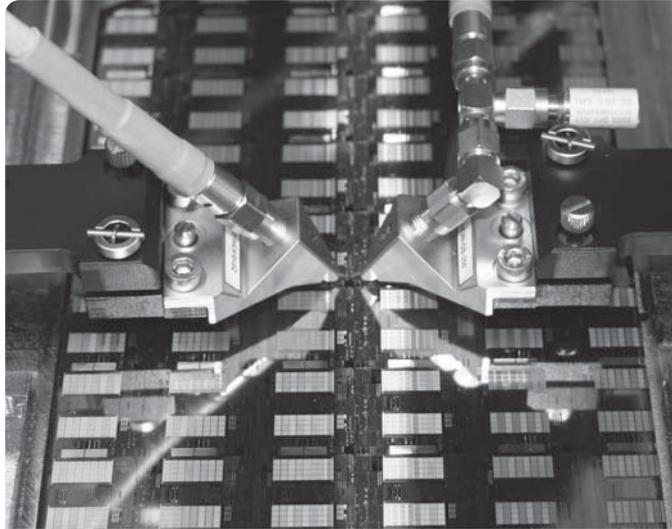
1. Как правило, ВЧ зонды монтируются на зондовых станциях в фиксированном положении (развернутыми относительно друг друга на 180 градусов), поэтому структуры на пластине должны размещаться с учетом этого условия.
2. ВЧ зонды поставляются главным образом в конфигурациях «земля-сигнал» (GS) или «земля-сигнал-земля» (GSG) и предназначены только для контактных площадок с определенным шагом между ними (как правило, варьируемым от 50 мкм до 250 мкм).
3. Чтобы исключить перекрестные помехи, минимальное расстояние между зондами должно быть не менее 200 мкм.
4. Все линии заземления должны быть соединены вместе.
5. Все контактные площадки для подачи смещения или контроля должны находиться вне основного сигнального тракта.
6. Для ВЧ зондов требуются кабели с разъемом BNC, а как правило, используются разъемы типа SMA.

Ниже показан пример типовой тестовой структуры, построенной с учетом данных указаний.



**Рис. 4.10.** Правильная компоновка структуры для использования ВЧ позиционеров

На рисунке ниже показаны ВЧ зонды для измерений на полупроводниковой пластине.



**Рис. 4.11.** Пример измерения на пластине с помощью ВЧ зондов (фото предоставлено компанией *SUSS Microtech*)

Компоновка и конструкция ВЧ позиционера будут обсуждены в главе 5 при рассмотрении высокоскоростных импульсных измерений, и в главе 8 при обсуждении высокочастотных измерений емкости. Обратите внимание, что в ВЧ зондах используются разъемы типа SMA, поэтому при подключении таких приборов, как измеритель емкости, вам понадобятся переходники с разъема BNC на SMA.

## Матричные коммутаторы

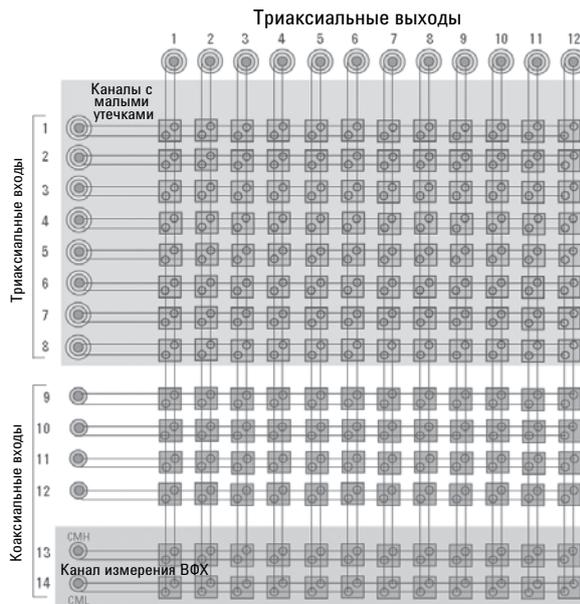
### Введение

Хотя матричные коммутаторы не обязательно используются при измерениях на полупроводниковой пластине, они практически не применяются при других типах измерений. При измерениях на пластине матричные коммутаторы позволяют повысить скорость измерения и упростить схему подключений (например, переключение между измерениями ВАХ и ВФХ). Матричный коммутатор для параметрического тестирования показан на рисунке ниже.



**Рис. 4.12.** Фемтоамперный коммутатор Agilent Technologies B2200A с малыми током утечки

Принцип работы матричного коммутатора довольно прост. Он состоит из рядов входов и выходов, связи между которыми могут быть установлены путем замыкания контактов одного или нескольких реле. Поскольку практически все соединения при параметрических испытаниях осуществляются с помощью триаксиальных кабелей, то почти все матричные коммутаторы преобразуют некоторое количество коаксиальных входов в триаксиальные выходы. В то время как количество входов матричного коммутатора фиксировано, количество выходов обычно определяется количеством плат, установленных в базовой блоке коммутатора. Каждая плата, как правило, добавляет к конфигурации несколько выходов. Пример платы матричного коммутатора представлен ниже.



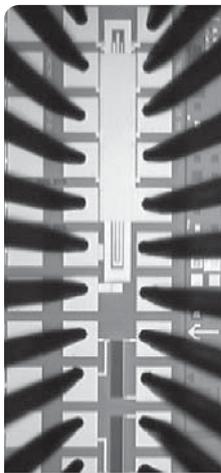
**Рис. 4.13.** Пример платы матричного коммутатора с коаксиальными и триаксиальными входами (а также выделенный канал для измерений ВФХ)

Сделаем ряд существенных замечаний по поводу указанной схемы.

Первое заключается в том, что не все триаксиальные каналы матричного коммутатора обязательно «слаботочные». Для указанной схемы платы это действительно так, но у матричного коммутатора не все платы такие. Второе замечание состоит в том, что матричный коммутатор преобразует все входы (триаксиальный и BNC) в триаксиальные выходы. Это очень удобно, поскольку избавляет от необходимости беспокоиться о переходниках с триаксиального разъема на разъем BNC. Третье (и последнее) замечание состоит в том, что некоторые платы коммутатора имеют специальный канал для измерения емкости. Тем не менее, мы отложим обсуждение измерений с помощью матричного коммутатора, пока не дойдем до главы 8 и не рассмотрим измерения емкости.

#### *Проб-карты и тестовый модуль*

Чтобы понять преимущества использования матричного коммутатора при проведении измерений на пластине, нужно сначала понять, как организованы тестовые структуры на пластине. Тестовые структуры на пластине обычно организованы в тестовые модули с, как правило, регулярным расположением контактных площадок (например, два ряда по двенадцать площадок). В сочетании с проб-картой, конфигурация которой соответствует конфигурации контактных площадок тестовых модулей, матричный коммутатор позволяет тестировать все тестовые структуры данного модуля без необходимости физического перемещения зондов. Использование матричного коммутатора с возможностью подключения или отключения определенных тестовых структур во время параметрических измерений позволяет экономить время, требуемое для физического перемещения зондов с одной тестовой структуры на другую. На следующем рисунке показаны наконечники проб-карты, контактирующие с тестовым модулем на пластине.



**Рис. 4.14.** Наконечники проб-карты, контактирующие с тестовым модулем на пластине

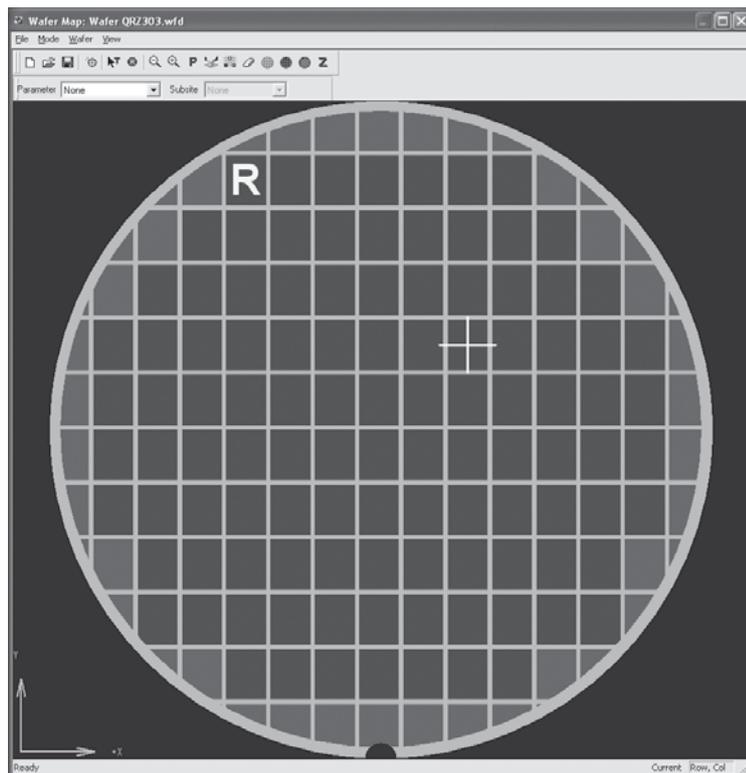
Использование проб-карты может существенно повысить производительность тестирования даже при работе на полуавтоматической зондовой станции.

Очевидно, что всеми преимуществами решения с матричным коммутатором и проб-картой можно воспользоваться только при использовании специального ПО для управления процессом тестирования. Основные требования к этому ПО приведены ниже:

1. Способность координировать ход тестирования с картой пластины, хранящейся в памяти полуавтоматической зондовой станции.
2. Возможность задания перемещений в пределах субкристалла для тестирования тестовых модулей внутри кристалла.
3. Возможность сохранять и изменять настройки матричного коммутатора для подключения к различным тестируемым устройствам.
4. Возможность хранения результатов измерений для каждого тестируемого устройства вместе с информацией о точном местоположении (и кристалла, и субкристалла) устройства на пластине.

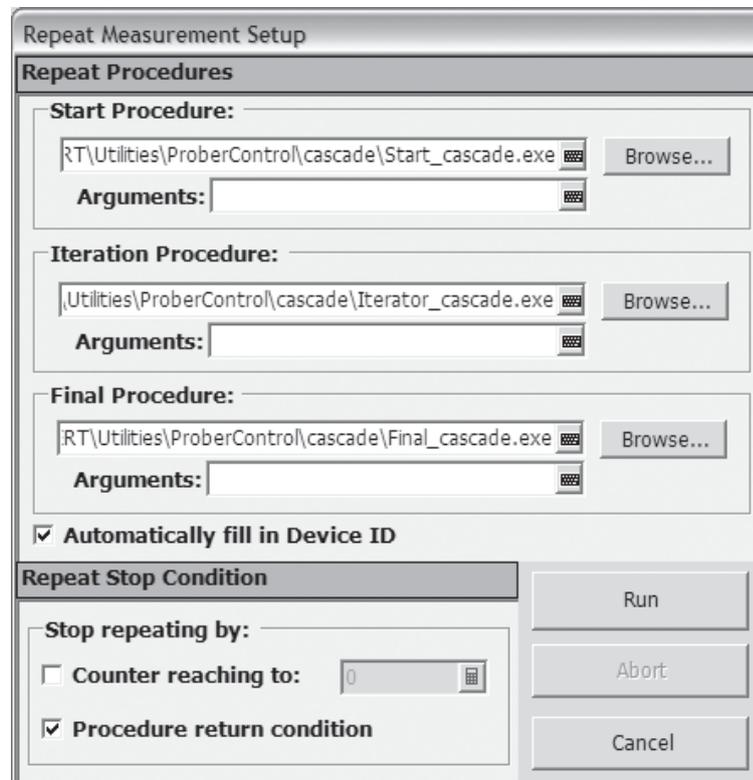
Всеми этими возможностями обладает программное обеспечение EasyEXPERT компании Agilent Technologies, которое может быть использовано для автоматизации тестирования на полуавтоматической зондовой станции.

Чтобы выполнить автоматизированное тестирование пластин с помощью ПО Agilent Technologies EasyEXPERT, вначале следует создать карту пластины на планируемой к использованию полуавтоматической исследовательской зондовой станции. Пример карты показан ниже.



**Рис. 4.15.** Создание карты пластины на полуавтоматической зондовой станции при подготовке к автоматизированному тестированию

После создания карты пластины можно начать автоматизированное тестирование. Для этого нужно открыть окно «Repeat Measurement Setup» (Повторить настройку измерения), нажав на кнопку «Repeat» в правом верхнем углу экрана главного меню программы EasyEXPERT.



**Рис. 4.16.** Окно «Repeat Measurement Setup» позволяет задать условия автоматизированного тестирования и повторения одного или нескольких измерений по всей пластине

**Примечание.** При этом необходимо включить функцию авторегистрации данных.

В ПО EasyEXPERT встроены драйверы полуавтоматических зондовых станций Cascade, SUSS и Vector. Кроме того, доступны образцы исходного кода, так что при необходимости вы можете создавать свои собственные драйверы зондовых станций. Путь к файлам драйверов станции следующий: Program Files\Agilent Technologies\B1500A\EasyEXPERT\Utilities\Prober Control. Для каждой поддерживаемой станции имеется папка с файлами, в которой находятся несколько исполняемых файлов. Нужный исполняемый файл можно найти в области «Repeat Procedures» окна «Repeat Measurement Setup» с помощью кнопки «Browse». Соответствующие исполняемые файлы имеются для каждой из трех строк: Start Procedure, Iteration Procedure и Final Procedure (рис. 4.16). По умолчанию флажок установлен в позиции «Automatically fill in Device ID». Это означает, что при каждой записи теста, выполняемого ПО EasyEXPERT, будет автоматически создаваться идентификатор (ID) устройства, позволяющий отслеживать, какой тест(ы) с каким кристаллом пластины связан(ы). Кроме того, если пометить галочкой поле «Procedure return condition» и щелкнуть кнопку «Repeat Stop Condition», то тестирование будет продолжаться до тех пор, пока не будет достигнут последней кристалл в карте пластины. Если пометить галочкой поле «Counter reaching to:» и указать число в окошке справа, то тестирование будет продолжаться до тех пор, пока не будет протестировано заданное число кристаллов. Если были выбраны оба условия, то тестирование будет остановлено в зависимости от того, какое условие будет выполнено первым. Введя вышеуказанную информацию, просто щелкните кнопку «Run» (Выполнить), чтобы начать скоординированное тестирование с помощью анализатора B1500A и вашей полуавтоматической зондовой станции.

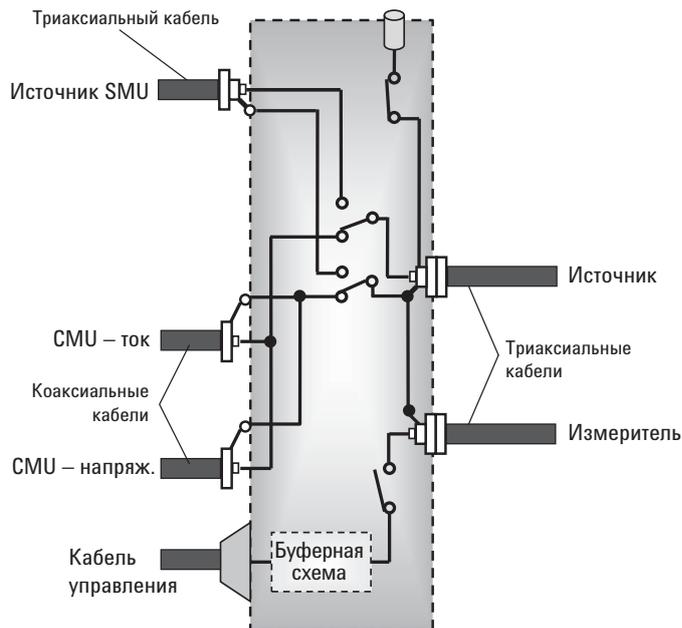
## Коммутация при использовании позиционеров

### Введение

Матричный коммутатор может быть очень экономически эффективным решением при использовании проб-карт. Однако подавляющее большинство лабораторных исследовательских зондовых станций предполагает использование не проб-карт, а отдельных позиционеров. Конечно, можно использовать матричный коммутатор и с позиционерами, но цену и сложность такого решения нельзя назвать оптимальной. К счастью, компания Agilent Technologies предлагает несколько коммутационных опций для зондовых станций с позиционерами, которые не требуют матричного коммутатора. Предлагаемые опции будут описаны ниже. **Примечание.** Поскольку ВЧ позиционеры НИКОГДА не используются с какими-либо коммутаторами, вся дальнейшая информация данного раздела относится к позиционерам постоянного тока.

### Модуль коммутации с атто-чувствительностью

Ранее в главе 3 при обсуждении SMU отмечалось, что имеется модуль коммутации с атто-чувствительностью (ASU), который при совместной работе со SMU высокого разрешения (HRSMU) позволяет измерить ток с разрешающей способностью до 0,1 фА. Кроме впечатляющей чувствительности при измерении малых токов, модуль ASU (как предполагает его название) также обладает встроенными коммутационными функциями. Каждый ASU имеет два входа с разъемами BNC, которые обычно предназначены для подключения к двум выходам модуля измерителя емкости (CMU), хотя они и могут использоваться с любым типом аппаратуры с BNC-выходами. Ниже представлена схема одиночного модуля ASU.



**Рис. 4.17.** Упрощенная схема модуля ASU, демонстрирующая его коммутационные функции

На рисунке ниже показаны входы ASU.



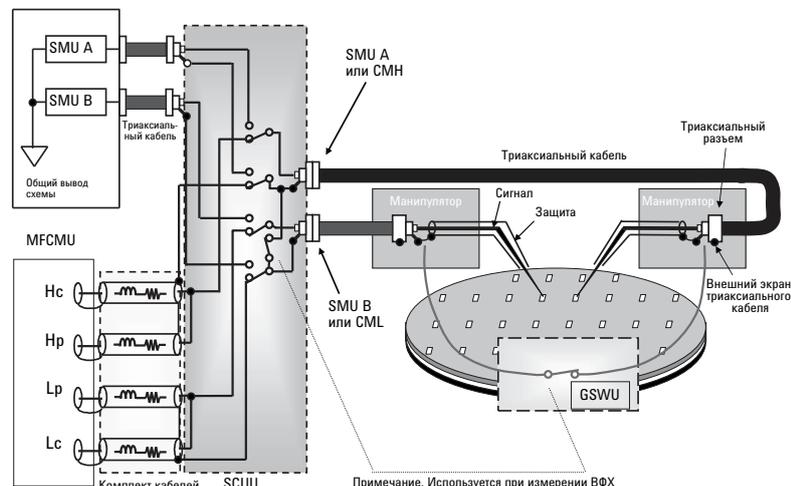
**Рис. 4.18.** Входы ASU: два коаксиальных (сверху), триаксиальный (от линии источника HRSMU, правый нижний) и вход кабеля управления (также подводится от HRSMU, левый нижний).

Преимущество сочетания функции коммутации с функцией измерения токов до 0,1 фемтоампер очевидно: можно переключать позиционеры с измерения ВАХ на измерение ВФХ без подсоединения или отсоединения кабелей. Кроме того, хотя вопрос о компенсации емкости не будет обсуждаться до главы 8, здесь достаточно отметить, что анализатор B1500A будет автоматически обнаруживать и компенсировать влияние двух поддерживаемых кабельных подключений (1,5 м и 3,0 м) между HRSMU и ASU. Это означает, что компенсация потребуется только для дополнительных элементов (триаксиальные кабели, позиционер и наконечник зонда), которые присоединяются к триаксиальным выходам ASU.

**Примечание.** Естественно, что длина таких «кабелей расширения» должна быть как можно короче.

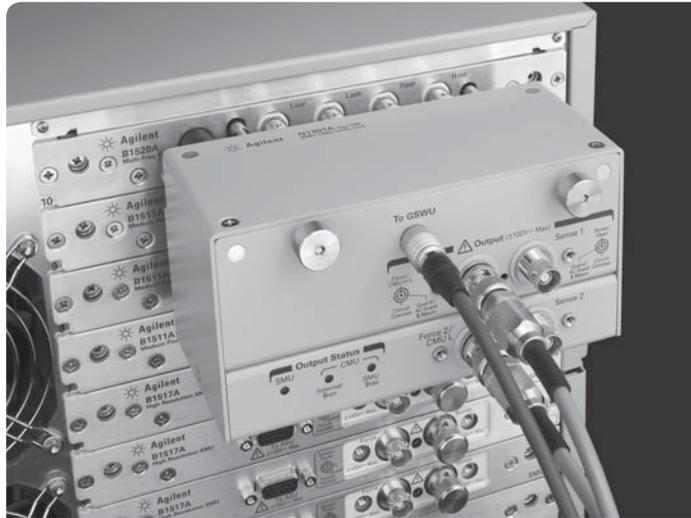
#### Унифицированный модуль SMU CMU

Модуль ASU хорошо подходит для зондовых станций с позиционерами для измерений ВАХ и ВФХ, но измерять ток с разрешением 0,1 фА нужно не всегда. По этой причине Agilent Technologies поддерживает два других решения по коммутации позиционеров для модулей SMU высокого разрешения (HRSMU) и средней мощности (MPSMU). В обоих решениях использован унифицированный модуль объединения SMU CMU (SCUU). SCUU представляет собой коммутационный модуль, предназначенный для работы с модулем многочастотного измерения емкости (MFCMU) прибора B1500A и двумя SMU высокого разрешения или средней мощности. Форм-фактор SCUU позволяет разместить на нем четыре BNC-выхода MFCMU и две пары триаксиальных четырехпроводных выходов от двух HRSMU и/или MPSMU. Модуль SCUU обеспечивает автоматическую коммутацию между MFCMU и парой HRSMU/MPSMU, а его выходы представляют собой две пары триаксиальных выходов. Схема соединений SCUUH показана ниже.



**Рис. 4.19.** Модуль SCUU позволяет переключаться между MFCMU и двумя SMU (HRSMU или MPSMU)

Ниже показан SCUU, установленный сзади B1500A.



**Рис. 4.20.** Модуль SCUU, установленный сзади B1500A. Данная иллюстрация показывает, как выходы MFCMU и SMU преобразуются в два набора триаксиальных выходов (источника и измерителя)

**Примечание.** Важно понять, что этот рисунок служит только для иллюстративных целей. При проведении практических измерений на пластине модуль SCUU никогда не монтируется непосредственно на задней части B1500A.

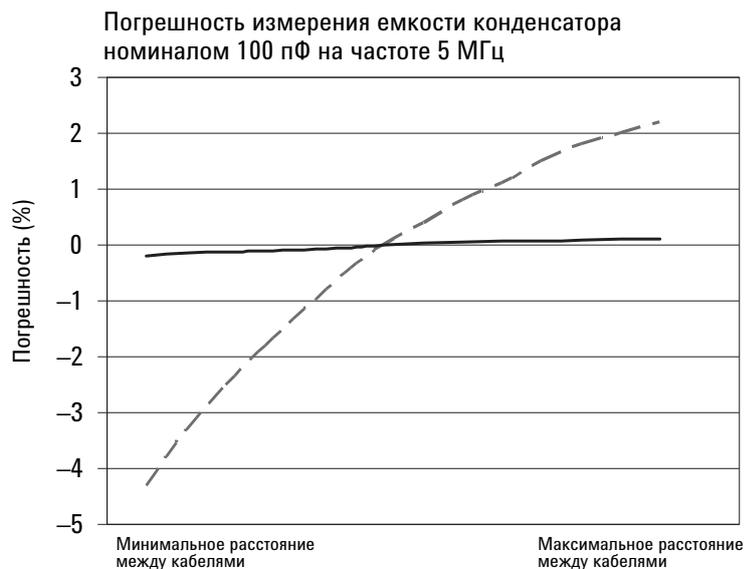
Преимущества этого решения для зондовых станций с позиционерами такие же, что и для модуля ASU: вы можете переключаться между измерениями ВАХ и ВФХ без замены кабелей. Как и в случае с ASU, компания Agilent Technologies предлагает кабель длиной 3,0 м, который позволяет смонтировать SCUU на исследовательской зондовой станции в непосредственной близости к испытываемому устройству, а анализатор B1500A будет автоматически обнаруживать и компенсировать влияние поддерживаемых кабелей. Как и для ASU, компенсация требуется только для дополнительных элементов (триаксиальных кабелей, позиционера и наконечник зонда), которые подключаются к триаксиальным выходам SCUU. Кроме того, Agilent Technologies может поставлять магнитное крепление для SCUU, хотя большинство компаний, выпускающих исследовательские зондовые станции, также могут поставить крепеж для SCUU.

Вместе с SCUU используется еще один опциональный компонент, о котором еще не упоминалось, хотя он и был показан на рис. 4.19, а идущий к нему кабель был показан на рис. 4.20. Это модуль коммутации Guard-экрана (GSWU). Он может быть подключен к SCUU с целью соединения (с помощью внутреннего реле) цепей Guard-экрана двух позиционеров, используемых вместе с SCUU при каждом измерении емкости. В обычном режиме измерения ВАХ модуль GSWU не соединяет цепи измерительного экрана. Безусловно, это необходимо, так как при измерении слабых токов линии Guard-экрана должны экранировать только соответствующие им сигнальные линии. Причины соединения цепей Guard-экрана во время измерения ВАХ будут обсуждаться в следующем разделе.

#### Объединение цепей Guard-экрана на время измерений

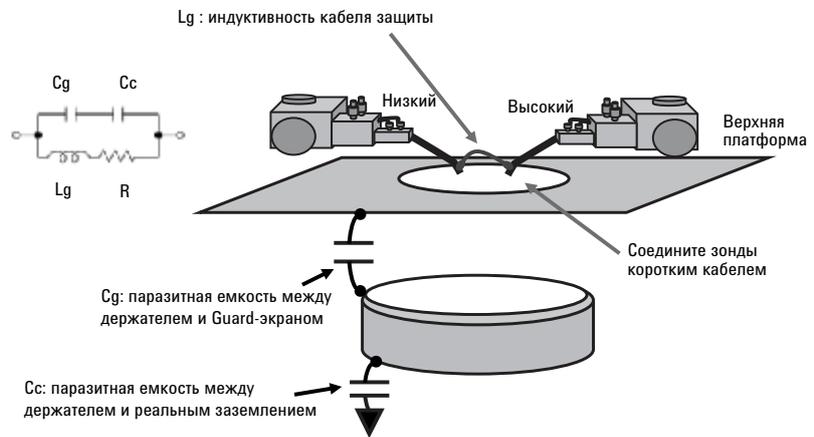
Пока мы не рассмотрим работу измерителя емкости в главе 8, невозможно подробно объяснить, почему объединение цепей Guard-экрана важно для измерения емкости. Поэтому пока мы можем только назвать основные причины, которые будут детально рассмотрены в главе 8.

Для измерения емкости необходимо измерить импеданс, который является комплексной величиной, состоящей из амплитуды и фазы (или активной и реактивной составляющей, если вы предпочитаете такие названия). Кроме сопротивления, все кабели также обладают емкостью и индуктивностью. Компенсируя влияние кабелей при измерении емкости, мы измеряем импеданс кабелей и вычитаем его из результата наших измерений, чтобы получить истинное (фактическое) значение емкости измеряемого конденсатора. При этом мы предполагаем, что значение импеданса кабелей стабильно. Однако при использовании гибких кабелей оказывается, что это допущение не верно. Если линии Guard-экрана не объединены, то любое движение кабелей может привести к изменению значения их последовательной индуктивности, в результате чего компенсация исчезает и результат измерения емкости становится неточным. Если линии Guard-экрана не замкнуты между собой, то последовательная индуктивность коаксиального кабеля может изменяться на несколько сотен наногенри (нГн) на метр. На представленном ниже графике показана возможная погрешность измерения емкости, если линии Guard-экрана не замкнуты между собой.



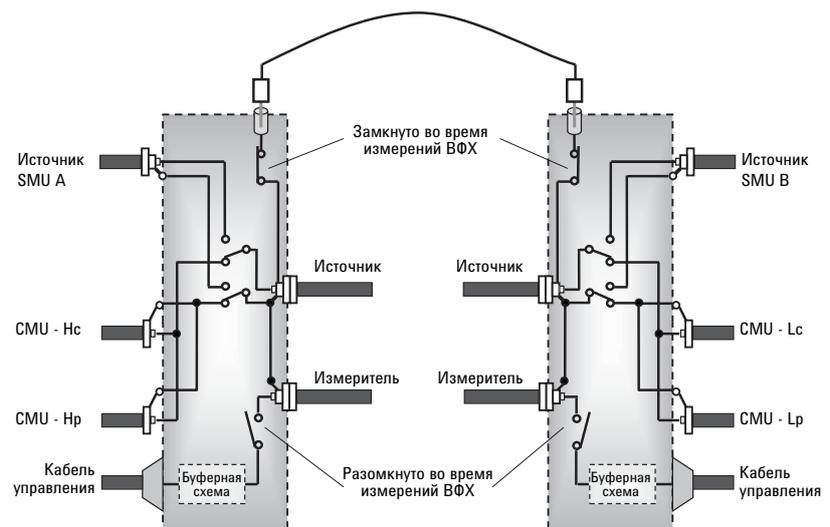
**Рис.4.21.** Сравнение погрешности измерения (в %) при измерении емкости конденсатора номиналом 100 пФ на частоте 5 МГц, если линии Guard-экрана замкнуты (непрерывная линия) и не замкнуты (пунктир) между собой

В дополнение к проблемам с изменяющейся последовательной индуктивностью, есть еще одна причина, по которой линии Guard-экрана должны быть замкнуты между собой при измерении емкости. Пластина, установленная на держателе, создает LCR-цепь, которая имеет резонансную частоту. Для того чтобы замкнуть накоротко эту цепь и предотвратить резонансные явления, следует соединить линии Guard-экранов зондов с помощью короткого кабеля, как показано на рисунке ниже.



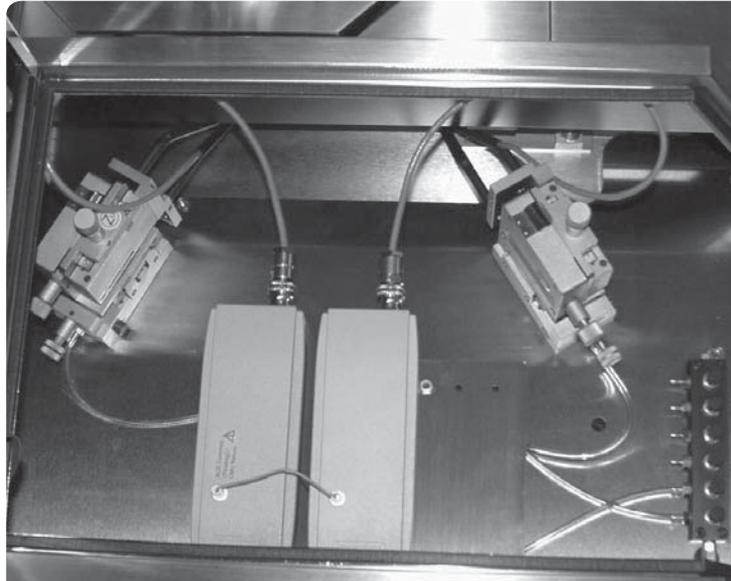
**Рис. 4.22.** В измерительной схеме может возникнуть параллельный резонансный контур, устранить который можно, замкнув между собой линии Guard-экранов

С учетом вышесказанного должно быть ясно, что линии Guard-экранов должны быть замкнуты между собой при измерении емкости с использованием модулей ASU и SCUU. С этой целью компания Agilent Technologies поставляет вместе с модулем ASU кабель для замыкания линий Guard-экранов. Если вы используете ASU совместно с анализатором B1500A и программным обеспечением EasyEXPERT, то ПО автоматически позаботится о том, чтобы линии Guard-экранов были замкнуты между собой всякий раз, когда вы измеряете емкость. Ниже представлена упрощенная схема соединений ASU при проведении измерений ВАХ и ВФХ.



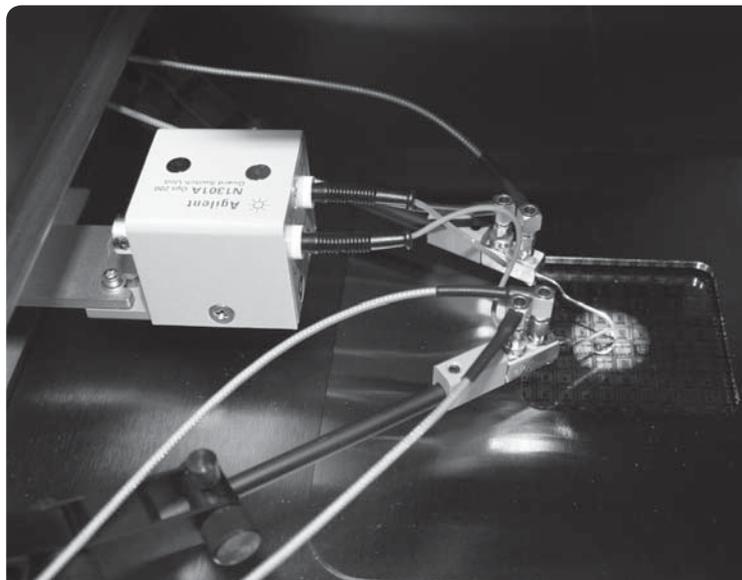
**Рис. 4.23.** Упрощенная схема соединений ASU при проведении измерений ВАХ и ВФХ

Ниже показаны два модуля коммутации с атто-чувствительностью (ASU), смонтированные на исследовательской зондовой станции, с соединенными вместе линиями Guard-экранов.



**Рис. 4.24.** Соединение Guard-экранов модулей ASU, установленных на исследовательской зондовой станции (Примечание. Фото предоставлено компанией SUSS Microtech.)

При использовании модуля SCUU дополнительно потребуется модуль GSWU, замыкающий между собой линии Guard-экранов во время измерения ВФХ. Как и в случае с ASU, программное обеспечение EasyEXPERT автоматически позаботится о том, чтобы линии Guard-экранов были замкнуты между собой всякий раз, когда вы измеряете ВФХ (при этом на модуле GSWU будет гореть светодиод). Ниже показан модуль GSWU, закрепленный на зондовой станции, с соединенными вместе линиями Guard-экранов двух позиционеров.



**Рис. 4.25.** Модуль GSWU, установленный на исследовательской зондовой станции, с соединенными вместе линиями Guard-экранов двух позиционеров (Примечание. Фото предоставлено SUSS Microtech.)

*Решения Agilent Technologies по коммутации измерений при использовании позиционеров*

В следующей таблице представлены три решения Agilent Technologies по коммутации измерений при использовании позиционеров. Модуль MFCMU анализатора B1500A может комбинироваться с модулями MPSMU или HRSMU с SCUU или ASU для переключения с измерения ВАХ на ВФХ с использованием позиционеров. Все решения четырехпроводные, они поддерживают коммутацию между измерениями ВАХ и ВФХ и имеют встроенную функцию компенсации при измерении емкости.

<b>Решение 10 фА/0,5 мкВ</b>	<b>Решение 1 фА/0,5 мкВ</b>	<b>Решение 0,1 фА/0,5 мкВ</b>
1 x MFCMU	1 x MFCMU	1 x MFCMU
2 x MPSMU	2 x HRSMU	2 x HRSMU
1 x SCUU	1 x SCUU	2 x ASU

Измерения по четырехпроводной схеме

Многочастотные измерения емкости

Переключение измерений ВАХ/ВФХ

Встроенная функция компенсации при измерении емкости

**Рис. 4.26.** Три решения по коммутации измерений при использовании позиционеров, поддерживаемые анализатором B1500A

**Примечание.** Методика измерения емкости с использованием матричного коммутатора будет подробно изложена в главе 8.

## Высоковольтные и сильноточные измерения на пластине

### *Обзор*

Для высоковольтных и сильноточных измерений на пластине следует использовать специализированные зондовые станции. Хотя такое утверждение кажется вполне очевидным, но иногда пользователи о нем забывают или игнорируют, желая поскорее начать силовые измерения на пластине. Мощные исследовательские зондовые станции имеют ряд важных отличий от стандартных исследовательских зондовых станций.

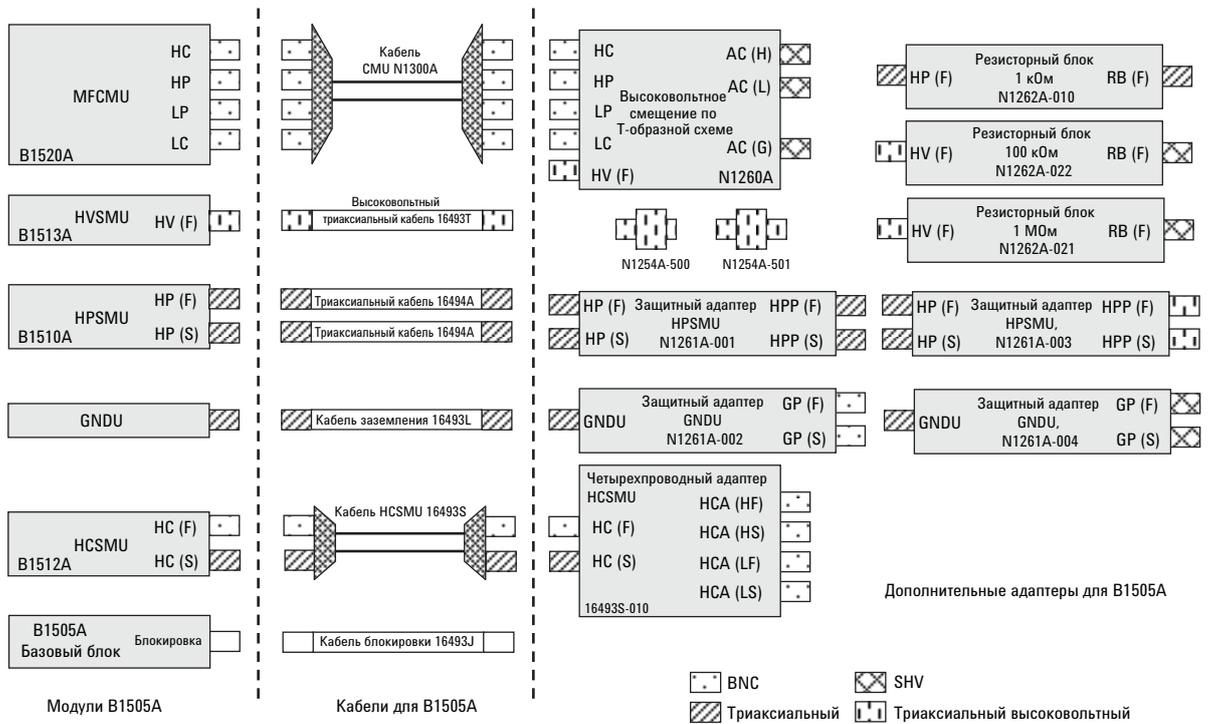
1. Наличие тщательно разработанных систем безопасности, предотвращающих любую возможность случайного воздействия высокого напряжения.
2. Использование уникальных разъемов, используемых для измерения высокого напряжения и сильного тока.
3. Специальные позиционеры для сильноточного зондирования пластин.

Как мы увидим далее в этом разделе, кабели и разъемы для высоковольтных и сильноточных измерений на пластине имеют гораздо более сложную конструкцию, чем используемые для стандартного зондирования пластин. Кроме того, различные производители исследовательских зондовых станций используют разные разъемы. Поэтому крайне важно точно определиться с тем, зондовую станцию какого именно производителя вы планируете использовать, чтобы специалисты Agilent Technologies смогли подобрать для вас правильное решение.

### *Как подключать?*

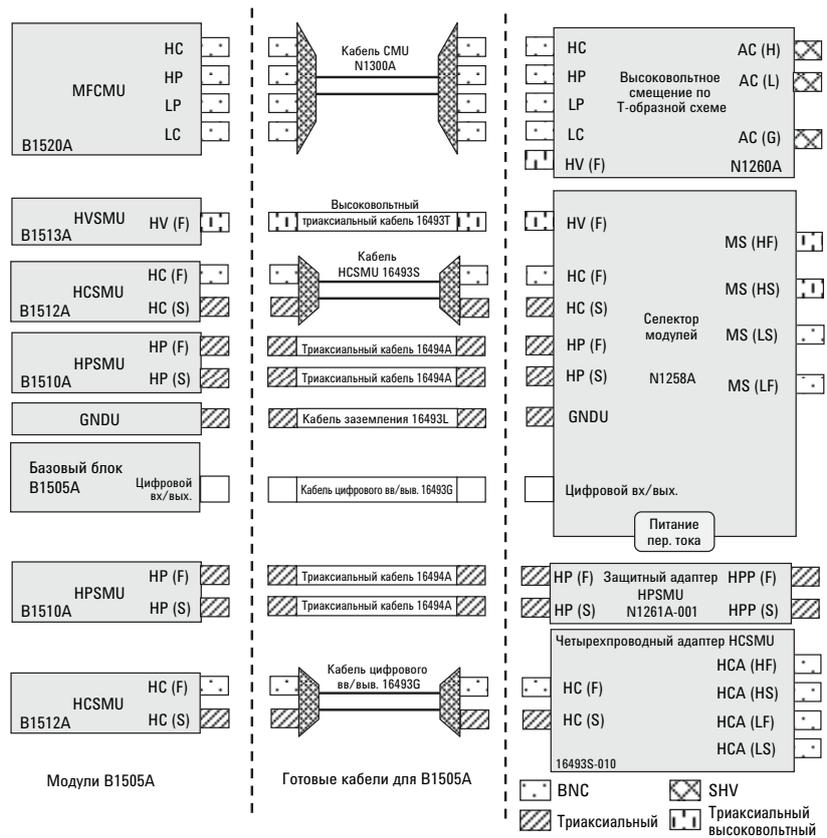
Первый вопрос, который следует рассмотреть, заключается в том, какого типа измерения вы собираетесь выполнять. Если планируются измерения только одного определенного типа (или только высоковольтные или только сильноточные), то вам, вероятно, не понадобится селектор модулей. Тем не менее, если вы собираетесь выполнять как высоковольтные, так и сильноточные измерения (или предполагаете, что это потребуется в будущем), то желательно приобрести селектор модулей. Как мы обсуждали в главе 3, селектор модулей позволяет переключаться между HVSMU, HCСMU или HPSMU без необходимости замены каких-либо кабелей. Конечно, вы можете использовать селектор, даже если к нему подсоединен только один из указанных модулей, ведь это позволяет легко расширить измерительные возможности вашего анализатора В1505А, дооборудовав его дополнительными модулями.

В комплект поставки заказываемого анализатора B1505A входят кабели, необходимые для всех установленных модулей. Хотя этих кабелей достаточно для подключения к силовой тестовой оснастке N1259A для тестирования корпусных устройств, вам потребуются дополнительные кабели и разъемы для подключения к зондовой станции. Некоторые из них могут быть поставлены компанией Agilent Technologies, а некоторые, возможно, должны предоставляться поставщиком вашей зондовой станции. Следует принять во внимание еще один фактор: некоторые из модулей малой мощности анализатора B1505A (HPSMU и GNDU) могут быть повреждены при воздействии высоких напряжений, генерируемых HVSMU. Чтобы избежать этого, можно заказать в компании Agilent Technologies различные защитные адаптеры, предотвращающие случайное повреждение таких модулей. Имеется несколько вариантов защитных адаптеров, оборудованных различными разъемами, используемых разными производителями исследовательских зондовых станций. Компания Agilent Technologies может также поставлять резисторные блоки (R-box) с резисторами разных номиналов (1 МОм, 100 кОм, 1 кОм) для последовательного подключения к используемым кабелям. Резисторные блоки 1 МОм и 100 кОм применяются для предотвращения повреждения устройства вследствие перепадов напряжения, а блоки 1 кОм можно использовать для подавления генерации колебаний в устройстве. Наиболее распространенные разъемы и адаптеры показаны на рисунке ниже.



**Рис. 4.27.** Agilent Technologies предлагает различные дополнительные адаптеры для использования с анализатором B1505A на исследовательской зондовой станции

Если вы планируете использовать вместе с вашей зондовой станцией селектор модулей, то кабели и аксессуары, которые вам понадобятся, будут отличаться от тех, которые вы используете в схеме без селектора модулей. Основное различие заключается в том, что селектор модулей содержит устройство защиты цепей, так что вам не нужно использовать защитные адаптеры для модулей, подключенных к селектору. Конечно, любой модуль, не подключенный к селектору, по-прежнему нуждается в использовании защитных адаптеров, если есть вероятность того, что на них могут быть поданы высокие напряжения и сильные токи. И снова с помощью продукции Agilent Technologies вы сможете создать правильную конфигурацию измерительной схемы для вашей зондовой станции. На рисунке ниже показаны наиболее распространенные разъемы и адаптеры, используемые с селектором модулей.

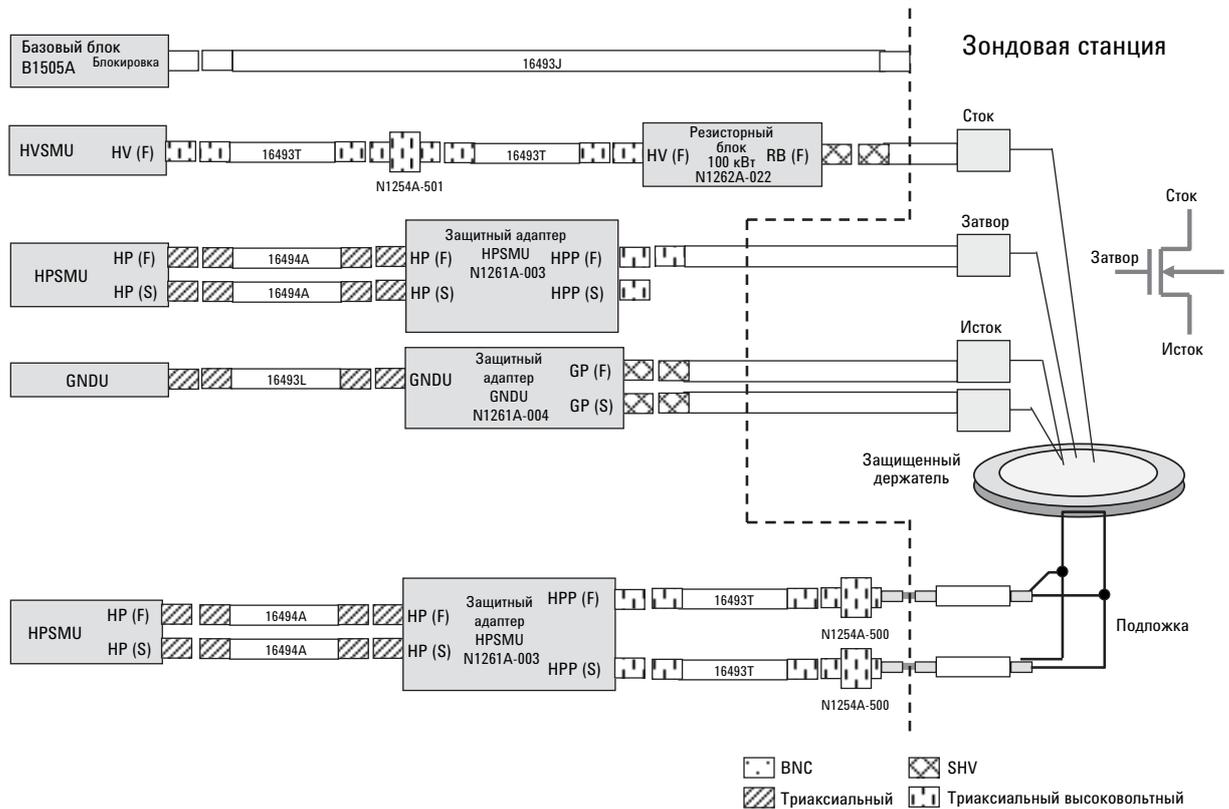


**Рис. 4.28.** Селектор модулей тоже выполняет защитные функции, поэтому для подключенных к нему модулей не нужен защитный адаптер

Столь богатая коллекция кабелей и адаптеров может привести в замешательство, поэтому ниже мы рассмотрим их использование на нескольких примерах.

**Примечание.** Использование высоковольтного смещения, подаваемого по T-образной схеме, будет пояснено в главе 8, посвященной измерению емкости.

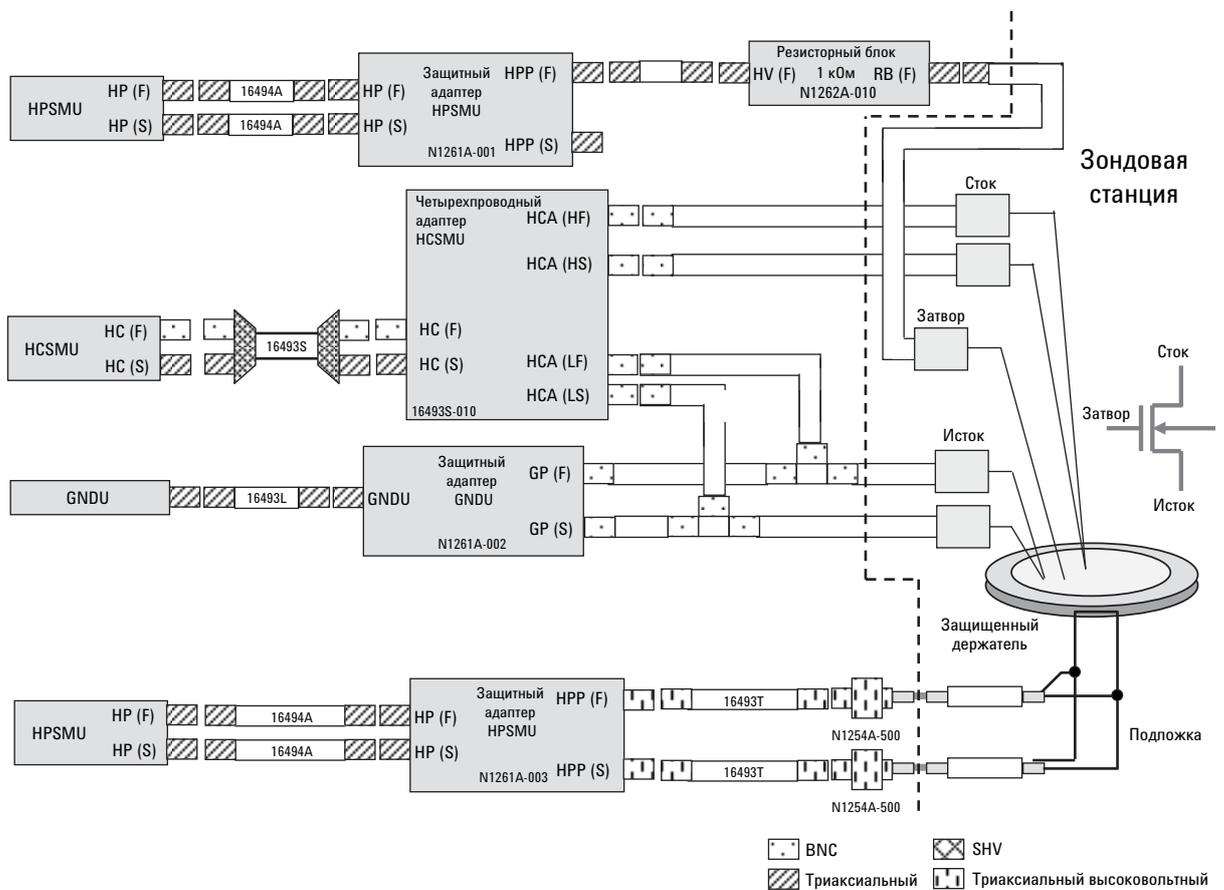
В качестве первого примера рассмотрим высоковольтное зондирование пластин с целью измерения напряжения пробоя и токов утечки устройств с поперечной структурой (например, при пробое между стоком и истоком в МОП транзисторах). Для высоковольтного зондирования пластин необходимо подключить вход блокировки анализатора B1505A к схеме блокировки, поддерживаемой вашей зондовой станцией. Также важно использовать защитные адаптеры для модулей HPSMU и GNDU с целью предотвращения подачи высокого напряжения на эти модули. Пример такой схемы приведен ниже.



**Рис. 4.29.** Конфигурация зондирования пластин на основе B1505A для выполнения высоковольтных измерений напряжения пробоя устройств с поперечной структурой

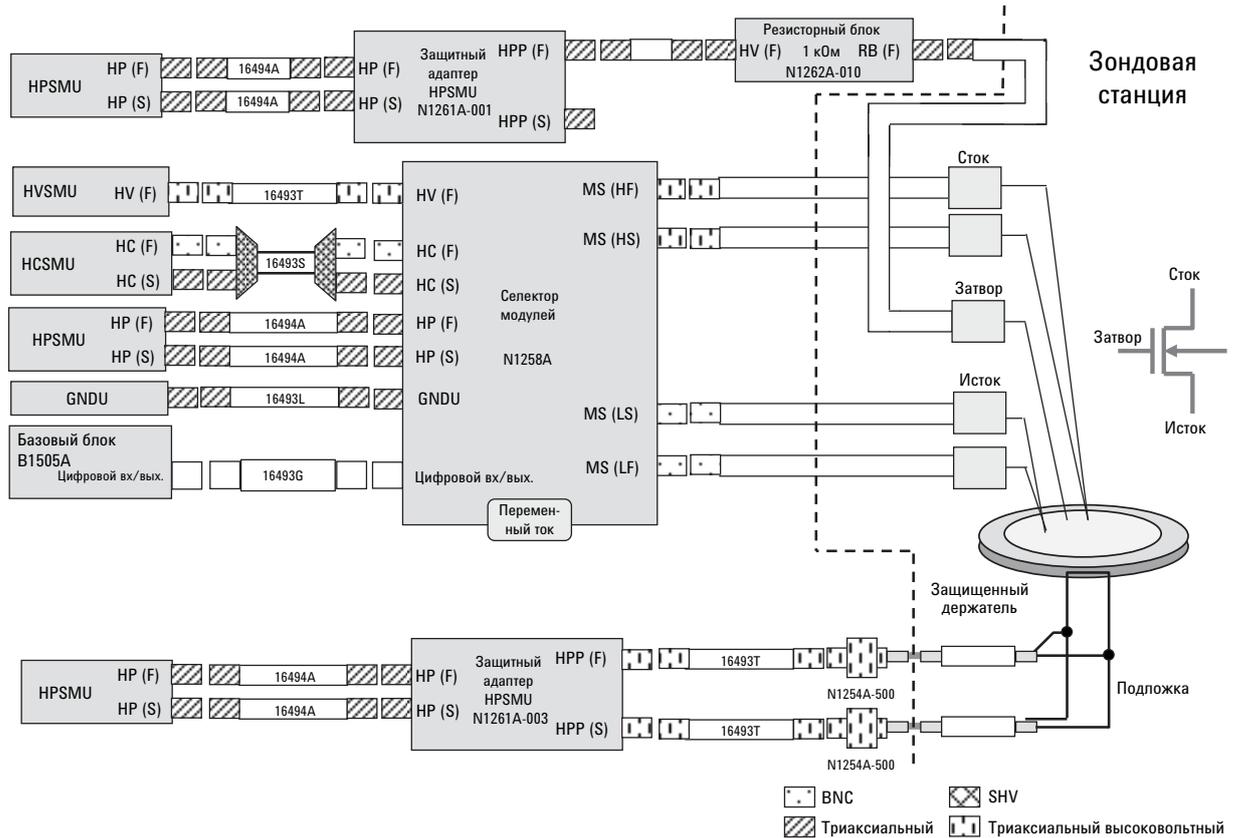
**Примечание.** Если ваша зондовая станция не поддерживает SHV или высоковольтное триаксиальное соединение, то вы можете использовать защитный адаптер N1261A-001 модуля HPSMU, который имеет триаксиальные выходы, а также защитный адаптер N1261A-002 модуля GNDU, оборудованный выходами с разъемами BNC.

В качестве второго примера рассмотрим сильноточное зондирование пластин для измерения сильных латеральных токов по четырехпроводной схеме (например, сильноточное измерение тока  $I_{си}$  МОП транзисторов). Обратите внимание, что с помощью четырехпроводного адаптера выходы модуля HCSMU (триаксиальный и BNC) разделяются на две группы выходов BNC: выходы источника/измерителя высокого уровня и выходы источника/измерителя низкого уровня. В этой ситуации четырехпроводная схема практически обязательна для предотвращения ошибок измерения из-за больших перепадов напряжения, вызванных активным сопротивлением кабеля при протекании многоамперных токов. Также вспомните, что в главе 3 мы объясняли, что выходы HCSMU гальванически развязаны с землей и поэтому при выполнении измерений выходы источника низкого уровня (LF) и измерителя низкого уровня (LS) должны быть привязаны к земле. На нашей схеме они соединены с модулем заземления через тройники с разъемами BNC. Пример такой схемы приведен ниже.



**Рис. 4.30.** Конфигурация зондирования пластин с помощью анализатора B1505A для выполнения измерений высоких уровней высоких уровней тока устройств с поперечной структурой

Как видно из предыдущих двух примеров, ручное переключение между высоковольтными и сильноточными измерениями на зондовой станции – не совсем обычная задача. Поэтому если нужно выполнить оба типа измерений, то следует приобрести селектор модулей. Он не только облегчит переключение между высоковольтными и сильноточными измерениями, но и позволит использовать HPSMU для выполнения высокоточных измерений сигналов низкого уровня, которые невозможно выполнить, используя только HVSMU и HCSMU. Как видно из следующей схемы, при использовании селектора модулей подключения зондовой станции сильно упрощаются.



**Рис. 4.31.** Конфигурация для зондирования пластин, построенная на основе анализатора B1505A с селектором модулей, позволяет проводить высоковольтные и сильноточные измерения без необходимости замены кабелей

Дополнительные затраты на покупку селектора модулей окупаются большим удобством и эффективностью работы.

# Глава 5. Вреязависимые и высокоскоростные измерения

*Опыт – это то, что вы получите только после того, как он понадобится.*

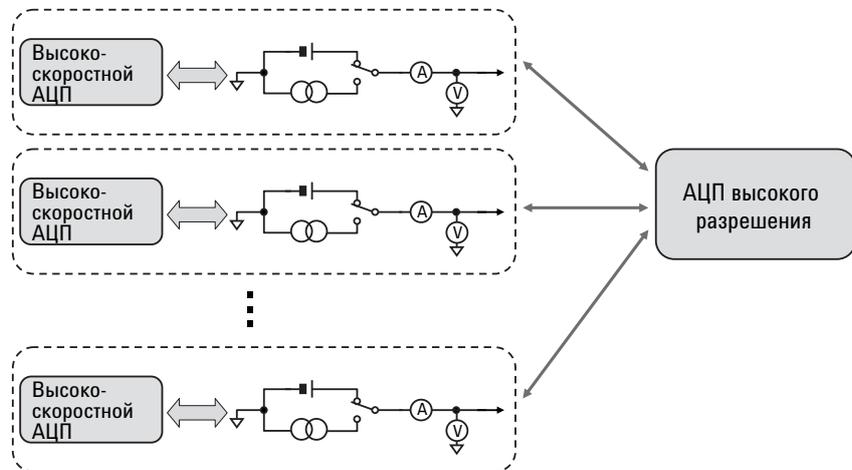
Автор неизвестен

## Введение

Одной из наиболее заметных тенденций параметрического тестирования является переход от простых свипирующих и точечных измерений (для которых время выполнения несущественно) к измерениям, при которых скорость их выполнения влияет на точность. В некоторых случаях для этого требуются либо новые типы измерительных модулей, отличающиеся от SMU, либо даже совместное использование внешних приборов (импульсных генераторов, осциллографов и т. д.) с оборудованием для параметрических измерений. Однако некоторые из новых параметрических анализаторов (например, Agilent Technologies B1500A и B1505A) могут выполнять ряд измерений с дискретизацией по времени, используя только собственные SMU. В силу этого потратим некоторое время на обсуждение всех возможных вариантов измерений.

## Параллельные измерения с использованием SMU

Важной особенностью всех вреязависимых тестов с использованием SMU является возможность параллельных измерений. Истинно параллельные измерения с использованием SMU возможны, только если для каждого SMU имеется собственный АЦП. Подобную возможность предоставляют следующие параметрические приборы Agilent Technologies: E5270B, B1500A и B1505A. У всех них (за исключением серии E5260A) для выполнения измерений ВАР можно выбрать режим работы с общим АЦП высокого разрешения (HR), либо режим работы с высокоскоростным АЦП (HS) для каждого SMU, как показано ниже.



**Рис. 5.1.** В приборах E5270B, B1500A и B1505A можно выбрать режим с высокоскоростным АЦП для каждого SMU или режим с общим АЦП высокого разрешения для всех SMU

В главе 3 мы обсуждали измерения с многоканальным свипированием с помощью анализаторов B1500A и B1505A. Данная функция позволяет B1500A и B1505A выполнять параллельные измерения на нескольких каналах при соблюдении следующих условий:

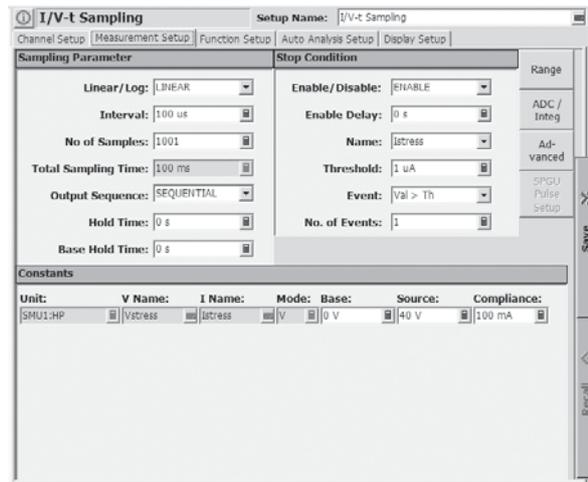
1. При параллельном измерении все SMU должны находиться в режиме многоканального свипирования.
2. При параллельном измерении каждый SMU должен использовать отдельный высокоскоростной АЦП.
3. При параллельном измерении все SMU должны работать в режиме с фиксированным диапазоном измерений.

Если все эти три условия соблюдены, то параллельное измерение выполняется автоматически. Как было сказано ранее при обсуждении режима многоканального свипирования, если начальные и конечные значения свипирования переменной VAR1 совпадают, то во время свипирования параметры SMU остаются неизменными и SMU работает в качестве источника напряжения или источника тока (при этом также можно проводить параллельные измерения).

В отношении этой процедуры часто задают вопрос: как проверить, действительно ли SMU выполняет измерения параллельно (поскольку отсутствует фактическая команда на выполнение параллельного измерения). Предлагается следующий метод проверки параллельности тестирования: нужно установить в обоих АЦП (HS и HR) очень большое время интегрирования (равное 4 или более периодам промышленной частоты). Измерение следует выполнить дважды: в первый раз SMU должно быть установлено для работы с HS АЦП, а во второй раз – с HR АЦП. При этом вы легко обнаружите, что длительность параллельного измерения будет отличаться от длительности непараллельного. Убедившись, что параллельные измерения выполняются правильно, можно вернуть нормальные настройки HS АЦП и выставить нужное для реальных измерений время интегрирования HS АЦП.

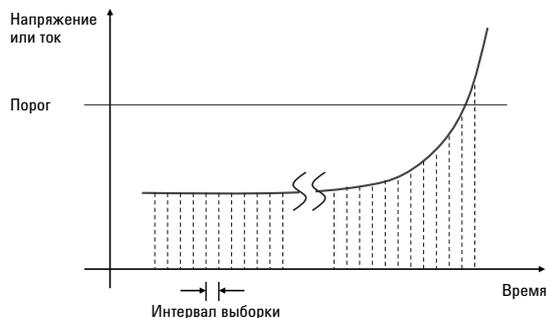
## Временная выборка с использованием SMU

До сих пор мы обсуждали проведение различных видов свипирующих и точечных измерений с помощью SMU, но при этом почти не упоминали о таком параметре, как время. Все приборы – 4155C, 4156C, B1500A и B1505A – имеют встроенный режим временной выборки, позволяющий их SMU измерять напряжения или токи через заданные промежутки времени. Такая возможность полезна для некоторых видов измерений надежности, например, измерения времени до пробоя диэлектрика (TDDB), когда устройство подвергается возбуждению и постоянно контролируется до момента пробоя изолирующего слоя. Ниже показан экран B1500A/B1505A с меню настройки временной выборки.



**Рис. 5.2.** Экран с меню настройки измерений в режиме временной выборки анализаторов Agilent Technologies B1500A/B1505A (режим классического тестирования)

Кроме интервала выборки (Interval) можно регулировать множество много других параметров. Параметр «No of Samples» (Число выборок) определяет максимальное количество выполняемых выборок; для B1500A/B1505A оно может достигать 100 001. Кроме того, можно делать выборки через интервалы времени, следующие в линейном или логарифмическом масштабе, причем поддерживаются различные логарифмические интервалы выборки (например, число выборок за декаду). Можно также указать «Stop Condition» (Условия останова), при которых будут прекращены измерения до того, как будет достигнуто максимальное количество выборок, если заданные Условия останова выполнены. Это очень важная функция, позволяющая сократить время тестирования благодаря прекращению измерений при наступлении желаемого события (например, пробоя оксидного слоя затвора, см. рисунок ниже).



**Рис. 5.3.** Задав Условия останова, можно прекратить выполнение измерений с временной выборкой при наступлении желаемого события (например, пробоя оксидного слоя затвора)

### *Сравнение последовательного и синхронного включения SMU*

При измерениях с временной выборкой иногда важно учитывать, каким образом активируются используемые SMU. Для некоторых видов измерений следует очень внимательно относиться к очередности включения SMU. Для других измерений может потребоваться одновременное включение ВСЕХ SMU. По этой причине все параметрические приборы Agilent Technologies, поддерживающие временные выборки (4155C, 4156C, B1500A и B1505A), поддерживают и последовательное, и синхронное включение выходов SMU. Если для анализаторов B1500A/B1505A выбрана настройка «sequential» (последовательный), то SMU будут включаться в порядке, указанном на странице настройки канала «Channel Setup» (сверху вниз). А если выбрана настройка «simultaneous» (синхронный), то все SMU включатся одновременно. Примечание: в обоих случаях (и при последовательном, и синхронном включении) отключаться SMU будут в порядке, обратном по отношению к показанному на странице «Channel Setup» (снизу вверх).

Важно понимать, что режимы временной выборки измерений новых приборов (а также их настройки по умолчанию) отличаются от аналогичных режимов в приборах, выпущенных перед 4145A/B. Во многих случаях результаты измерения с дискретизацией во времени на приборе 4145A/B и на приборах 4155C, 4156C, B1500A или B1505A будут различаться. Это связано с различиями в последовательности включения SMU. Если у вас возникли проблемы при сопоставлении результатов измерений, выполненных на этих приборах, то следует очень тщательно сравнить их настройки.

### *Настройка интервала временной выборки*

При проведении измерений с SMU в режиме временной выборки очень важно понять, что для данного устройства точность важнее всех прочих настроек. Этот момент часто упускается из виду, что приводит к разочарованию и растерянности. Из этого следует, что вам не удастся задать параметры измерения с SMU в режиме временной выборки, которые конфликтуют с указанной вами точностью измерения. SMU всегда будет работать столько времени, сколько ему необходимо для выполнения измерения с указанной точностью, независимо от того, сколько времени вы выделили ему на это.

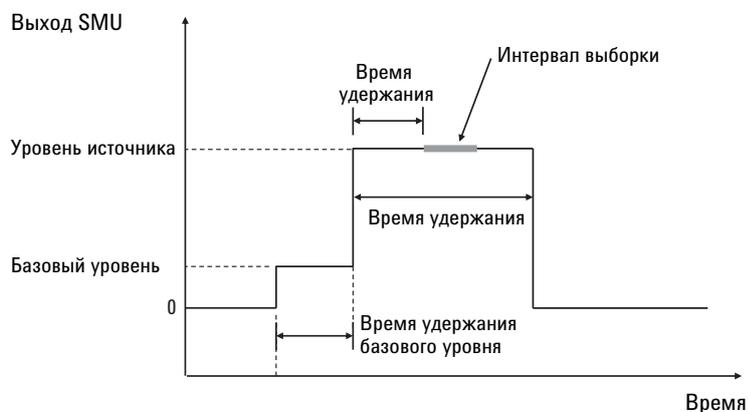
Этот момент очень легко упустить при выборе условий измерения. Например, работа в режимах с ограниченным диапазоном и с автоматическим выбором диапазона заставляет SMU продолжать работу до тех пор, пока не будет достигнут оптимальный диапазон измерения (или предел диапазона). Очевидно, что на это потребуются длительное время. Если вы попытаетесь задать длительность интервала повторения выборки меньше времени, необходимого SMU для выбора нужного диапазона измерений, то SMU будет просто игнорировать эту настройку времени и работать столько, сколько понадобится для завершения измерения. Таким образом, при работе в режиме временной выборки всегда рекомендуется использовать фиксированный диапазон измерений. Аналогичным образом в режиме измерений с временной выборкой вы не можете использовать интегрирование по периодам промышленной частоты. Время интегрирования должно быть меньше одного периода промышленной частоты и даже в этом случае вы должны быть осторожны, чтобы не указать время интегрирования, которое превышает заданный интервал измерений.

Ограничения, связанные со строгим порядком выполнения процедуры измерений и настройками времени выборки, действительны для используемого прибора. Если на анализаторах B1500A/B1505A установлен интервал выборки менее 2 мс, то следует учитывать следующие важные моменты:

1. Во всех измерительных каналах должен использоваться высокоскоростной АЦП; при использовании АЦП с высоким разрешением интервалы выборки менее чем 2 мс не поддерживаются.
2. Если НЕ выбран режим измерения с фиксированным диапазоном, то в измерительных каналах автоматически выбирается самый низкий фиксированный диапазон измерения, который включает значение «ограничения», выбранное для данного канала.
3. Если ожидаемое время измерения, определяемое заданным числом выборок, усредняемых за время интегрирования, больше интервала дискретизации, то каналы измерения будут пытаться регулировать число усредненных выборок таким образом, чтобы сохранить заданный интервал дискретизации.
4. Если выбраны несколько каналов измерения и все параметры установлены правильно, то все каналы измерения будут работать параллельно.

#### *Расширенные функции временной выборки (B1500A/B1505A)*

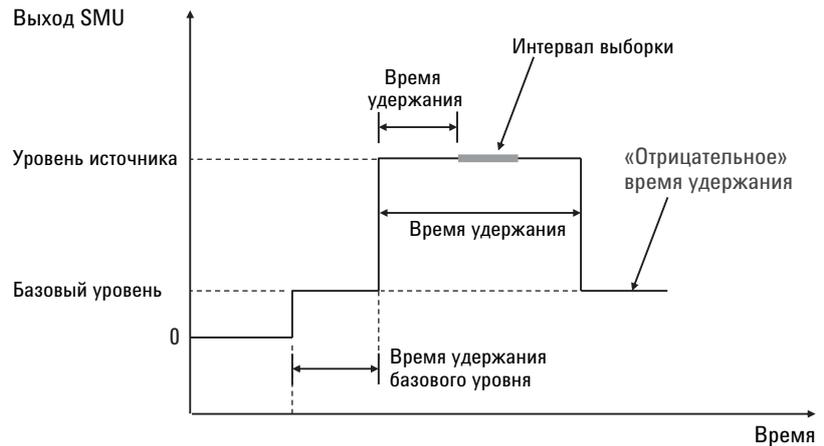
Мы потратили много времени, объясняя, как SMU проводит измерения в режиме временной выборки, но не обсуждали, как SMU вырабатывают напряжение и ток. В режиме временной выборки SMU анализаторы B1500A и B1505A реально поддерживают несколько полезных функций источника, которые находят некоторые важные применения в измерениях. Для начала давайте рассмотрим главный выход SMU во время измерения с временной выборкой.



**Рис. 5.4.** Основные параметры источника SMU при проведении измерений в режиме временной выборки на анализаторах B1500A/B1505A

Отметим, что пользователь может задать значения базового уровня и времени удержания базового уровня. Следует указать, что при построении этой и следующей диаграммы предполагалось, что время измерения меньше заданного интервала выборки (как это и должно быть, если все настроено правильно).

В анализаторах B1500A и B1505A также предусмотрена очень полезная функция, которую можно найти в настройках «Advanced» (Расширенные). Она позволяет выходу SMU оставаться активным ПОСЛЕ завершения измерения. Эта функция называется «сохранение смещения после измерения» и пользователь может выбирать, что поддерживать: базовый уровень или уровень источника. Ниже представлен рисунок, иллюстрирующий случай, когда SMU настроен на поддержание базового уровня.



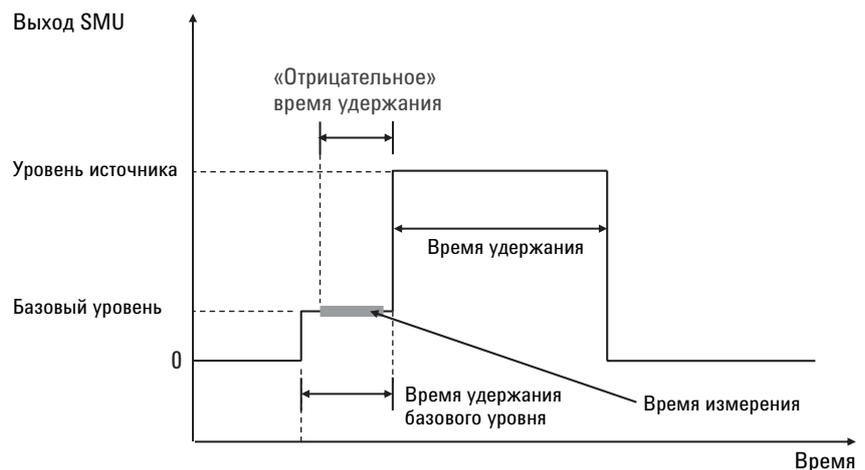
**Рис. 5.5.** Анализаторы B1500A и B1505A позволяют поддерживать на выходе SMU смещение (на базовом уровне или на уровне источника) и по завершении измерения

**Примечание.** Важно понимать, что смещение поддерживается только в двух случаях:

1. Когда выполняются многочисленные тесты в ходе другого приложения
2. Когда выбран режим тестирования «Quick Test» (Быстрое тестирование)

Функция сохранения смещения НЕ аналогична режиму ожидания SMU (Standby Mode), позволяющим включить SMU с заданным выходным значением в любое время (даже когда измерение не проводится).

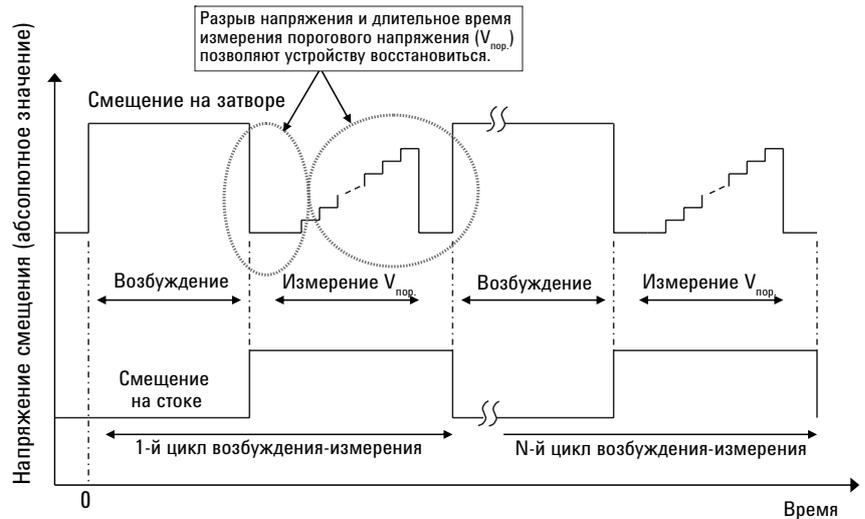
Наконец, есть еще одна очень интересная функция, поддерживаемая анализаторами B1500A и B1505A в режиме временной выборки. Это возможность задавать «отрицательные» значения времени удержания (то есть опережение). Что это такое, показано на рисунке ниже.



**Рис. 5.6.** B1500A и B1505A поддерживают «отрицательное» время удержания, что позволяет SMU начинать измерения ДО активации источника SMU

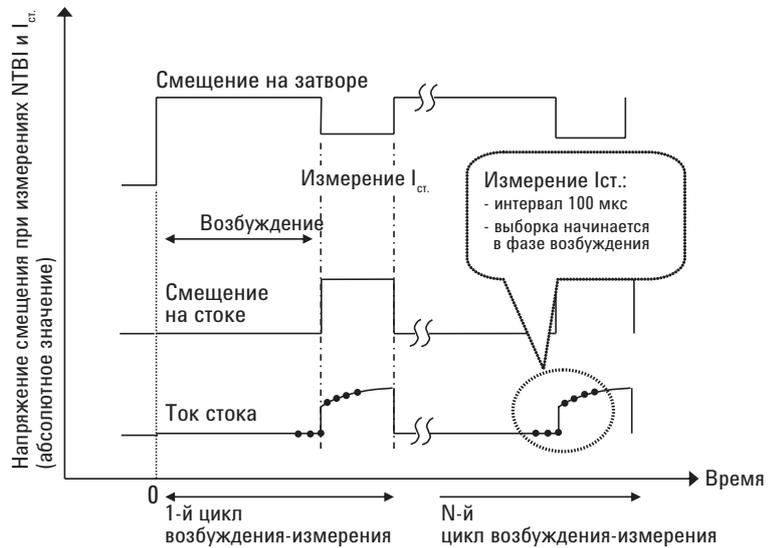
Важно отметить, что функция с «отрицательным» временем удержания поддерживается при условии, что интервал выборки составляет менее 2 мс, а максимальное значение опережения составляет -90 мс.

Расширенные функции временной выборки можно эффективно использовать только для определенных видов измерения надежности. В частности, они позволяют SMU очень быстро и эффективно выполнять измерения температурной нестабильности при отрицательном смещении (NBTI). По сути, измеряя NBTI, мы прикладываем напряжение смещения к затвору транзистора, а затем периодически снимаем это напряжение для измерения характеристик транзистора. Однако если во время перехода от возбуждения к измерению напряжение падает до нуля, то транзистор может «восстановиться» и результаты измерений будут неправильными.



**Рис. 5.7.** Важно, что во время измерения NBTI не происходит разрыва при переходе от возбуждения к измерению

Используя функцию сохранения смещения на B1500A/B1505A, мы можем быть уверены, что этого не произойдет. Кроме того, с помощью функции опережения («отрицательного» времени удержания), можно начать фактическое измерение, когда устройство еще остается в состоянии возбуждения. Это гарантирует, что во время перехода от возбуждения к измерению никакие данные не будут потеряны. Такая методика показана на рисунке ниже.



**Рис. 5.8.** Выполнение сверхбыстрых измерений NBTI с помощью SMU B1500A

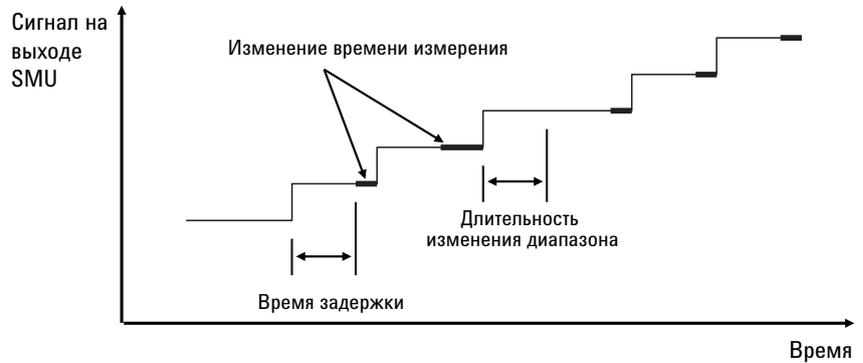
Эта методика часто называется «измерение NBTI на лету». B1500A может выполнять эти измерения на одном SMU с интервалом 100 мкс. B1500A выполняет параллельные измерения, используя несколько SMU через промежутки времени, вычисляемые по следующей формуле:

$$t = 100 \text{ мкс} + [20 \text{ мкс} \times (n - 1)],$$

где «n» – число SMU, задействованных в параллельных измерениях. Дополнительная информация представлена в соответствующих рекомендациях по применению B1500A.

## Поддержание постоянного шага свипирования

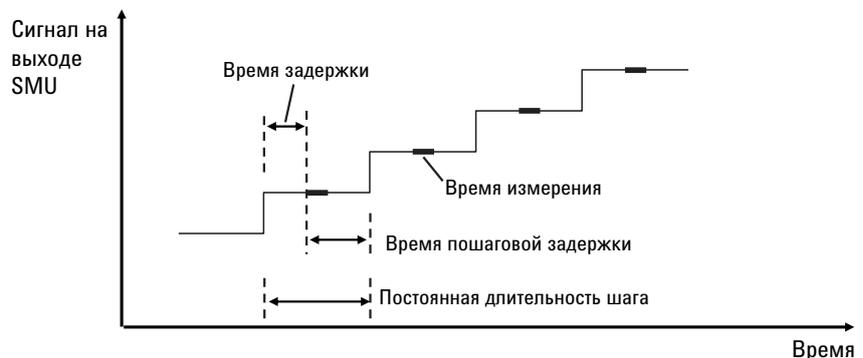
Иногда желательно выполнить свипирующие измерения с постоянным шагом свипирования. Однако важно понимать, что при стандартных свипирующих измерениях нет гарантии, что времени измерения будет достаточно для выполнения измерения в каждой точке в диапазоне свипирования. Эта ситуация проиллюстрирована следующим графиком.



**Рис. 5.9.** При стандартном свипирующем измерении значения времени, затрачиваемого на измерение в каждой точке, могут существенно различаться

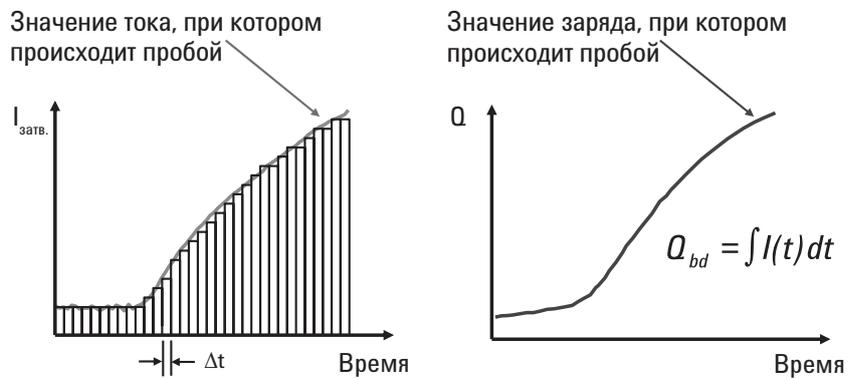
Отметим два момента, влияющих на свипирующие измерения и показанные на этом рисунке. Во-первых, время измерения изменяется от одной точки измерения к другой. Во-вторых, при смене диапазона измерений возникает длительная задержка между точками измерений.

Существует ряд способов решения обеих вышеуказанных проблем. Приборы для параметрических измерений поддерживают функцию пошаговой задержки «Step Delay». Она позволяет задать интервал времени, отсчитываемый от начала текущего измерения, в течение которого прибор не переходит к следующей точке свипирования. Поэтому если заданная пошаговая задержка превышает ожидаемое максимальное время измерения, то мы можем установить постоянную длительность каждого шага. Конечно, все это остается верным, пока мы не столкнемся с изменением диапазона. Для гарантии того, что диапазон не изменится, следует использовать режим с фиксированным диапазоном. Главное, чтобы выбранный фиксированный диапазон содержал максимальное ожидаемое значение, измеряемое во время свипирования.



**Рис. 5.10.** Постоянный шаг свипирования обеспечивается при использовании функции пошаговой задержки и режима измерений с фиксированным диапазоном

Для некоторых измерений надежности поддержание постоянной длительности шага свипирования очень важно. Наиболее распространенными из них являются тестирование пилообразным напряжением (VRAMP) и пилообразным током (JRAMP). Ниже показан пример тестирования VRAMP, в котором для получения единой длительности шага пилообразного нарастания напряжения использована функция пошаговой задержки.



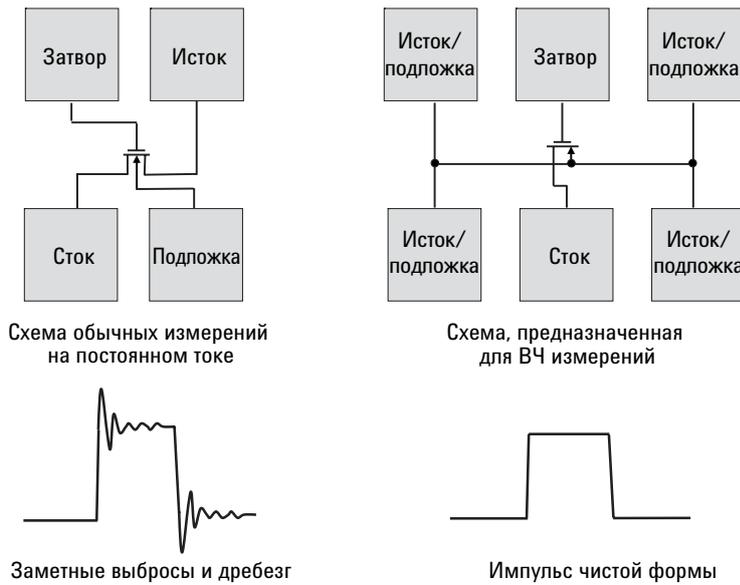
**Рис. 5.11.** Использование функции пошаговой задержки для получения единой длительности шага при пилообразном свипировании (VRAMP) позволяет легко вычислить значение суммарного заряда, при котором происходит пробой ( $Q_{bd}$ )

При поддержании постоянной длительности шага свипирования напряжения очень легко вычислить значение заряда, при котором происходит пробой ( $Q_{bd}$ ), измеряя ток затвора в каждой точке свипирования с помощью простой прямоугольной аппроксимации:

$$Q_{bd} = \int I(t) dt \approx \sum I \cdot \Delta t$$

## Разработка структур для высокоскоростных испытаний

Для успешного проведения высокоскоростных измерений недостаточно просто подобрать подходящие средства измерений. Вам следует использовать соответствующие тестовые структуры. Попытки выполнить быстрые импульсные измерения на обычных тестовых структурах на постоянном токе с использованием позиционеров постоянного тока вряд ли приведут к корректным результатам. Для выполнения быстрых импульсных измерений требуются тестовые структуры с контактными площадками земля-сигнал (GS) или земля-сигнал-земля (GSG) и ВЧ позиционеры (см. рисунок ниже).



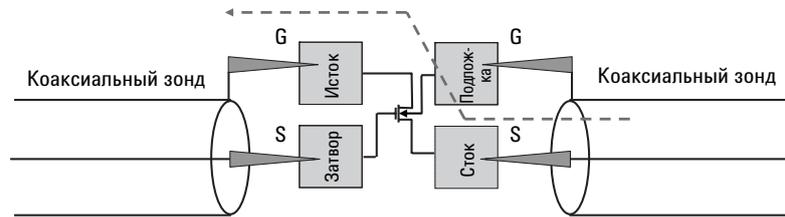
**Рис. 5.12.** При сравнении схем видно, что обычные тестовые структуры с зондами постоянного тока не позволяют добиться удовлетворительных результатов при попытке провести быстрые импульсные измерения

Ниже показан наконечник ВЧ зонда GSG.



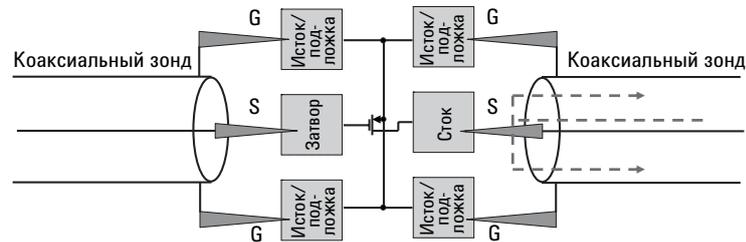
**Рис. 5.13.** Наконечник зонда GSG. Обратите внимание, что он снабжен коаксиальным разъемом SMA (Фото представлено SUSS Microtech)

Зонды GSG не всегда лучше зондов GS, так как результаты измерений в значительной степени зависят от схемы размещения контактных площадок и от структуры ИУ. Но по следующему рисунку можно понять, почему на высоких частотах зонды GSG могут оказаться лучше зондов GS.



Часть энергии входного сигнала проходит значительное расстояние до земли через ИУ.

→ Значительные потери сигнала на высоких частотах (не касается измерений на постоянном токе)



Вся энергия входного сигнала проходит короткое расстояние до земли через ИУ.

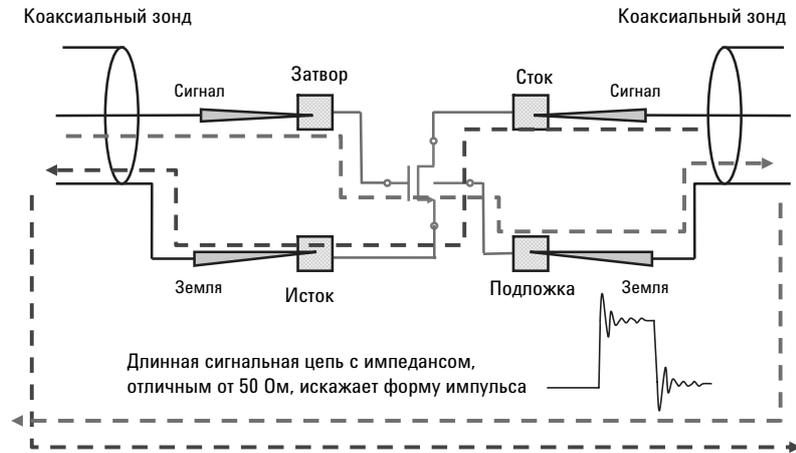
→ Потери сигнала на высоких частотах минимальны.

**Рис. 5.14.** Зонды GSG могут обеспечить лучшие результаты измерений на более высоких частотах по сравнению с GS за счет того, что обратный путь входного сигнала у них короче

Основное ограничение для зондов GS заключается в том, что обратный путь сигнала возбуждения ИУ на землю может оказаться очень длинным, что приводит к существенной потере энергии сигнала. Аналогичный путь для GSG-зондов гораздо короче, что сводит к минимуму потери сигнала на частоте измерения.

Другим фактором является полоса пропускания применяемого ВЧ зонда. Поскольку наименьшая длительность импульсов, используемых в параметрическом тестировании, составляет около 10 нс, то на первый взгляд может показаться, что полосы пропускания равной одной или двум сотням мегагерц было бы достаточно. Однако на самом деле это не так. Вспомним, что прямоугольный сигнал (импульс) можно представить в виде суммы бесконечного ряда синусоидальных колебаний (нечетные гармоники). Полоса частот выбранных ВЧ зондов (так же и вашей системы в целом) должна быть достаточна для пропускания высших гармоник, в противном случае форма импульса искажается. Поэтому для получения чистой формы импульса длительностью 10 нс, как правило, требуется полоса пропускания не менее 1 ГГц.

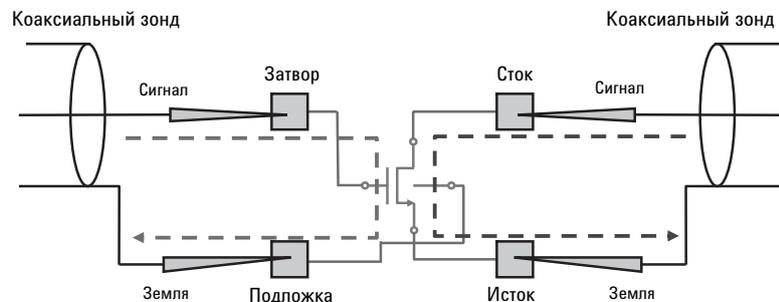
Кроме типа ВЧ зонда и его полосы пропускания, на форму импульсного сигнала также сильно влияет компоновка схемы тестирования. В частности, размещение контактов стока и истока МОП транзистора на противоположных сторонах схемы приводит к чрезвычайно длинным путям прохождения сигнала. В результате появляется дребезг и форма импульса возбуждения сильно искажается, как показано на рисунке ниже.



Оптимально для импульсов длительностью  $\geq 200$  нс

**Рис. 5.15.** Если при GS-зондировании контакты стока и истока расположены на противоположных сторонах схемы, то не искажаются импульсы только длительностью 200 нс и более

В схемах с размещением выводов стока и истока на противоположных сторонах, как правило, не искажаются импульсы только длительностью 200 нс и более. Поэтому гораздо лучше располагать выводы истока и стока на одной стороне схемы, как показано на рисунке ниже.

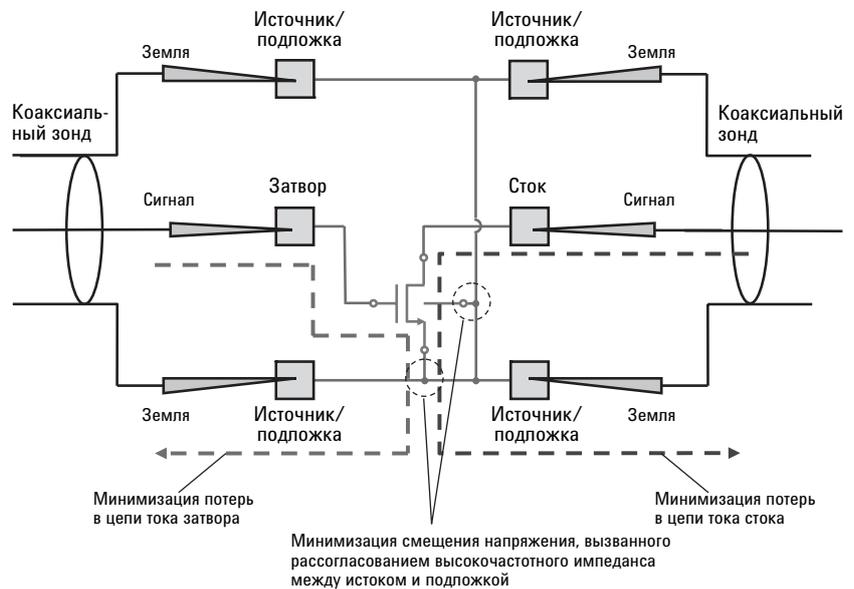


Оптимально для импульсов длительностью  $\geq 100$  нс

**Рис. 5.16.** Если при GS-зондировании контакты стока и истока расположены на противоположных сторонах схемы, то не искажаются импульсы длительностью около 100 нс

Размещение выводов истока и стока на одной стороне обеспечивает гораздо более короткий путь сигнала, при этом в схеме с контактными площадками земля-сигнал (GS) поддерживаются импульсы длительностью от 100 нс.

Для проведения измерений с импульсами длительностью до 10 нс требуется использовать схему с контактными площадками земля-сигнал-земля (GSG), в которой выводы истока и подложки соединены между собой. Пример показан ниже.



Оптимально для импульсов длительностью  $\leq 10$  нс

**Рис. 5.17.** Схема зондирования с контактными площадками земля-сигнал-земля, в которой выводы истока и подложки соединены между собой, поддерживает импульсы длительностью 10 нс и менее

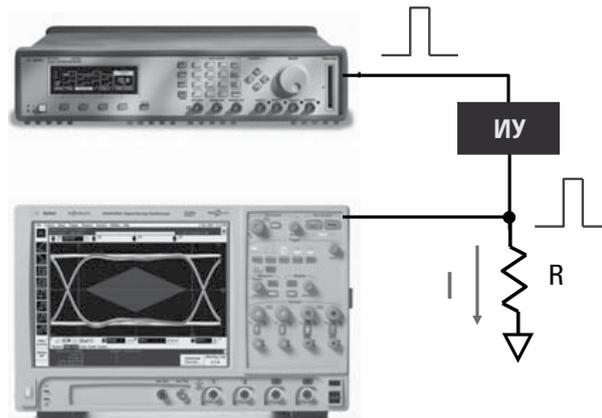
Экспериментальные результаты подтверждают, что такая схема позволяет гарантированно обеспечивать «чистые» импульсы длительностью 10 нс на затворе МОП транзисторов.

## Быстрые измерения обычных и импульсных ВАХ

### Обзор

Все чаще при параметрических измерениях требуется выполнять быстрые измерения обычных и импульсных ВАХ. Это вызвано рядом причин, к которым относятся новые физические эффекты, вызванные уменьшением размеров при литографии и соответствующим понижением напряжения, использованием новых и экзотических материалов, а также увеличением скорости работы, вызывающим сильные переходные токи. В силу столь широкого круга причин сложно создать универсальное решение – гибкое и экономически эффективное. Например, для ряда импульсных измерений могут потребоваться высокие напряжения при относительно невысоких требованиях к импульсным характеристикам; для других, возможно, потребуются низкие напряжения при относительно «быстрых» импульсах. Конечно, можно разработать решение «все в одном», удовлетворяющее обоим требованиям, но затраты на его создание могут быть непомерно высоки (особенно это заметно при поддержке нескольких измерительных каналов для параллельного тестирования). Поэтому гораздо лучше иметь широкий круг решений, позволяющий пользователю выбрать то, что лучше всего соответствует его бюджету и требованиям к тестированию.

До недавнего времени решения для быстрых импульсных измерений ВАХ, как правило, включали прецизионный импульсный генератор и осциллограф, как показано на следующем рисунке.



**Рис. 5.18.** Обычное решение для быстрых импульсных измерений с использованием имеющихся в продаже измерительных приборов

Здесь ток, протекающий через ИУ, рассчитывается из напряжения, измеренного на шунтирующем резисторе с помощью осциллографа. Однако такое решение имеет ряд недостатков:

1. Требуется прецизионный резистор.
2. Требуется специальное программное обеспечение, объединяющее все приборы.
3. Решение имеет ограниченную точность.
4. Можно тестировать только по одному устройству.
5. Требуется много внешних кабелей.

Хотя ни один из этих недостатков не является непреодолимым, на их ликвидацию могут потребоваться многочасовые усилия. Как правило, более выгодно использовать либо автономное аппаратное решение, либо решение, включающее внешнее оборудование и профессионально разработанное программное обеспечение. В последующих разделах мы рассмотрим несколько решений по быстрому измерению импульсных ВАХ и обсудим типы измерительных задач, для которых они лучше всего подходят.

### Высоковольтный полупроводниковый генератор импульсов (HV-SPGU)

Анализатор B1500A поддерживает однослотовый двухканальный модуль HV-SPGU, который может генерировать импульсы с амплитудой  $\pm 40$  В ( $80$  В<sub>пик-пик</sub>) при холостом ходе. Для импульсных измерений ВАО он способен выдавать импульсы длительностью от 5 мкс до 10 с. **Примечание.** Хотя модуль HV-SPGU способен генерировать импульсы напряжения длительностью порядка 50 нс, при использовании в импульсных измерениях ВАО длительность импульса ограничивается собственным минимальным интервалом измерения тока (равным 5 мкс). На рисунке ниже показана передняя панель модуля HV-SPGU с двумя выходными каналами. В один анализатор B1500A можно установить до пяти модулей HV-SPGU для измерений максимум по десяти каналам. Синхронизация между модулями поддерживается при помощи внешних соединений между выходами и входами «Ref Out», «Ref In», «Sync Out» и «Sync In».



Рис. 5.19. Двухканальные модули HV-SPGU для B1500A генерируют импульсы  $\pm 40$  В

Хотя многие особенности данного генератора импульсов делают его идеальным решением для тестирования флэш-памяти, он также может использоваться для быстрых импульсных измерений. Для повышения точности в модуле HV-SPGU предусмотрена встроенная функция контроля напряжения, измеряющая фактическое напряжение на выходе. Упрощенная схема модуля HV-SPGU показана ниже.

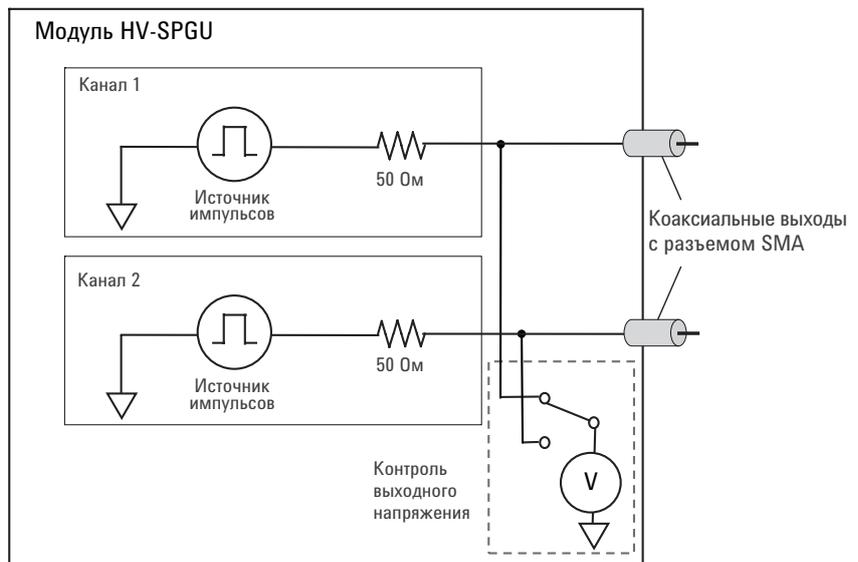
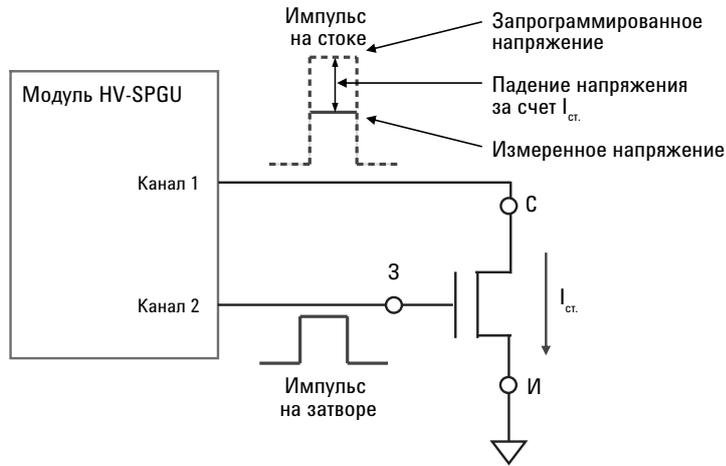


Рис. 5.20. Упрощенная схема модуля HV-SPGU с цепью контроля выходного напряжения обоих каналов

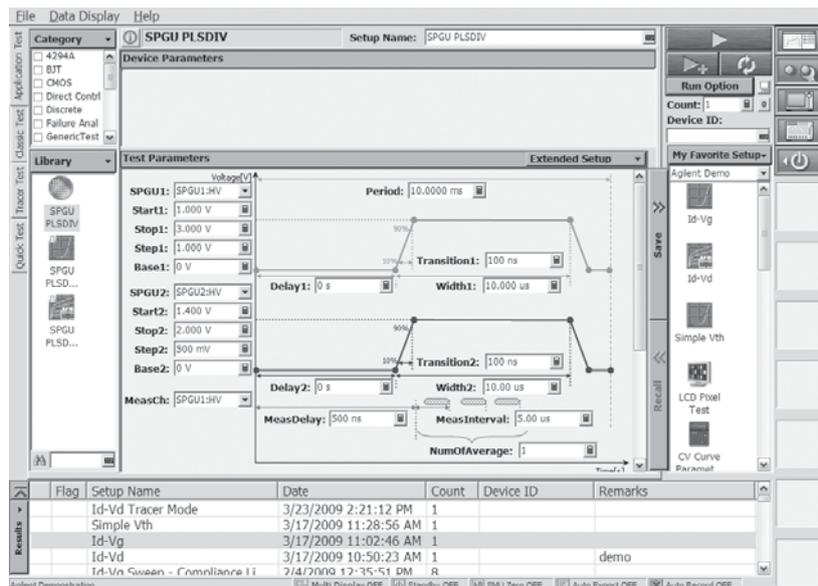
Базовые импульсные измерения вольт-амперных характеристик МОП транзисторов могут быть выполнены только одним модулем HV-SPGU при подключении стока к одному каналу, а истока – к другому, как показано ниже.



**Рис. 5.21.** Выполнение импульсных измерений вольт-амперных характеристик МОП транзисторов с помощью одного модуля HV-SPGU

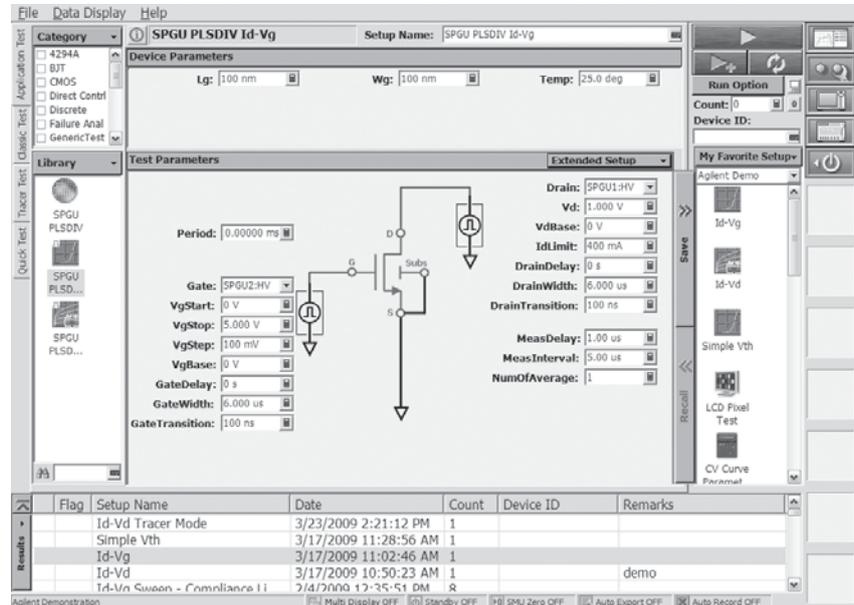
Определив разность между запрограммированным и измеренным напряжением, и пользуясь тем, что выходной импеданс является известной величиной (50 Ом), можно легко рассчитать ток, протекающий через выход модуля HV-SPGU.

Несмотря на то, что этот расчет довольно прост, практическое получение точного значения  $I_{ст}$  может оказаться сложной задачей. Чтобы упростить ее решение, компания Agilent Technologies предоставляет библиотеку прикладных тестов для выполнения импульсных измерений ВАХ с помощью HV-SPGU. Большинство базовых прикладных тестов позволяет настроить отдельные (точечные) импульсные измерения на двух каналах HV-SPGU. Окно настроек такого прикладного теста показано ниже.



**Рис. 5.22.** Окно базового прикладного теста ПО EasyExpert для импульсных измерений ВАХ на анализаторе B1500A с помощью модуля HV-SPGU

Сам по себе такой прикладной тест не несет особенной пользы, однако его можно использовать внутри других прикладных тестов для создания комплексных импульсных прикладных тестов с целью измерения ВАХ. Используя эту технологию, Agilent Technologies предлагает два часто необходимых прикладных теста для импульсного свипирования при снятии ВАХ  $I_{ct} - V_{ct}$  и  $I_{ct} - V_{ct}$ . На рисунке ниже показано окно ввода параметров для импульсного прикладного теста  $I_{ct} - V_{ct}$ .



**Рис. 5.23.** Пример окна ввода параметров прикладного теста ПО EasyEXPERT для быстрого измерения характеристики  $I_{ct} - V_{ct}$  на анализаторе B1500A с помощью модуля HV-SPGU

Окно ввода параметров импульсного прикладного теста  $I_{ct} - V_{ct}$  выглядит аналогично.

Благодаря возможности генерировать импульсы высокого уровня напряжения, модуль HV-SPGU хорошо подходит для тестирования устройств в «среднем» диапазоне мощности (например, устройств на основе GaAs и HEMT транзисторов, используемых в ВЧ приложениях). Кроме того, он хорошо подходит для измерения переходных токов в цепях, где требуется амплитуда более 10 В.

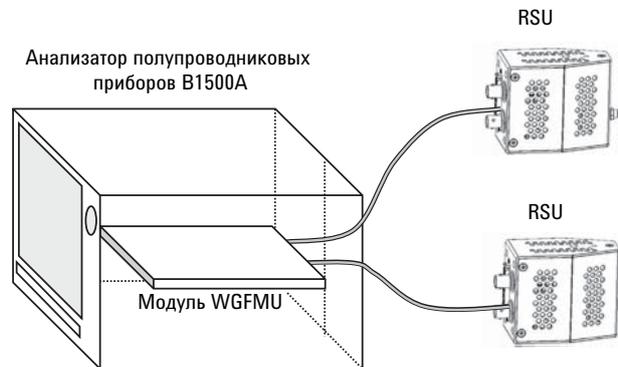
#### Генератор сигналов/быстродействующий измеритель (WGFMU)

Анализатор B1500A поддерживает однослотовый двухканальный модуль WGFMU для измерений импульсных ВАХ, который может генерировать импульсы с амплитудой  $\pm 3$  В,  $\pm 5$  В, от 0 В до 10 В или от -10 В до 0 В. При этом длительность импульса составляет от 100 нс и практически до бесконечности. В одном приборе B1500A можно установить до пяти модулей WGFMU с общим количеством каналов до 10. Как и в случае с модулем HV-SPGU, синхронизация между модулями WGFMU поддерживается с помощью внешних соединений между выходами и входами «Sync Out» и «Sync In». Фотография выходов модуля показана ниже.



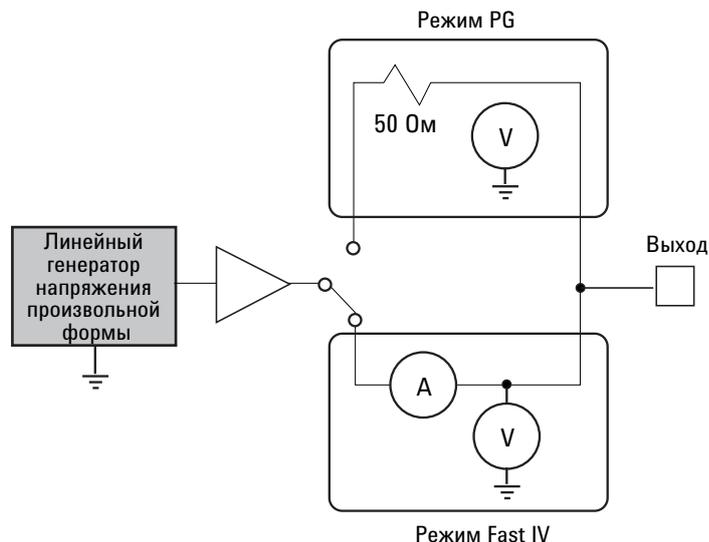
**Рис. 5.24.** Модуль WGFMU для B1500A выдает импульсы амплитудой до 10 В пик-пик и длительностью от 100 нс

При работе анализаторов B1500A с модулями WGFMU дополнительно требуются два выносных модуля измерения и коммутации (RSU), подключаемых к модулю WGFMU готовыми кабелями. Модуль WGFMU, установленный в базовый блок, формирует сигналы произвольной формы, которые затем по кабелям передаются на RSU. Модуль RSU, который измеряет фактический ток или напряжение, отделен от модуля WGFMU так, чтобы его можно было разместить рядом с испытуемым устройством (ИУ) для минимизации длины кабеля, что гарантирует точное высокоскоростное измерение.



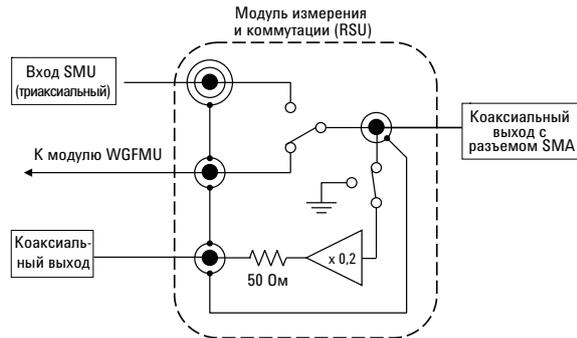
**Рис. 5.25.** В односпотовом модуле имеется два канала, к каждому из которых подключается модуль RSU

В каждом канале WGFMU имеется независимый линейный генератор напряжения произвольной формы (ALWG) с двумя режимами работы, выбираемыми пользователем: PG и Fast IV. Режим PG позволяет проводить очень быстрые измерения напряжения при выходном импедансе 50 Ом, минимизирующем отражения сигнала. В режиме Fast IV скорость измерения несколько ниже, а фронты импульсов более пологие, чем в режиме PG, но Fast IV позволяет измерять и ток, и напряжение. Ниже показана упрощенная схема одного канала, объединяющего модули WGFMU и RSU.



**Рис. 5.26.** Упрощенная схема одного канала, объединяющего генератор сигналов/быстродействующий измеритель (WGFMU) и модуль измерения и коммутации (RSU)

Кроме высокоскоростных измерений, каждый модуль RSU может переключать свой выход между WGFMU и дополнительным SMU. И хотя даже наличие перехода с триаксиального на коаксиальный кабель не позволяет полностью использовать технические характеристики SMU в процессе измерений, данная функция коммутации позволяет пользователю сравнивать результаты измерений на постоянном токе, выполненных с помощью WGFMU, с измерениями, выполненными с помощью SMU. Кроме того, каждый RSU также имеет коаксиальный выход, который может быть подключен через внутреннюю буферную схему к коаксиальному выходу с разъемом SMA. Это позволяет контролировать выходной сигнал RSU на отдельном приборе, например, осциллографе. Схема, иллюстрирующая эти возможности, показана ниже.



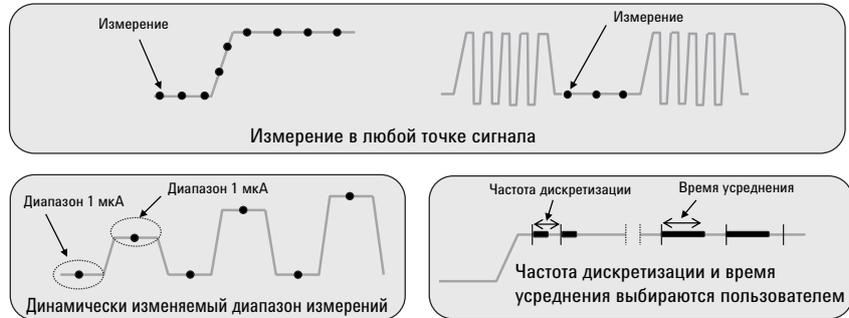
**Рис. 5.27.** В модуле RSU предусмотрена функция, позволяющая работать с дополнительным SMU и с внешним устройством контроля, например, осциллографом

Ниже представлена фотография входов и выходов модуля RSU.



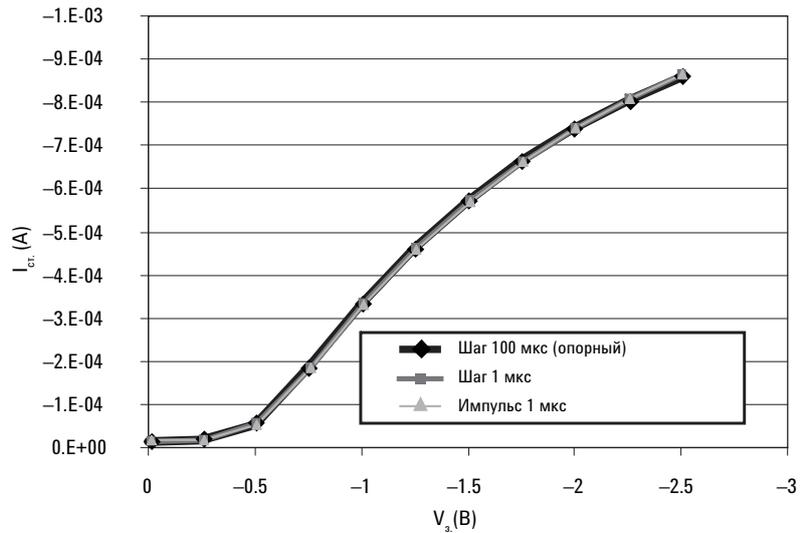
**Рис. 5.28.** На фотографии модуля RSU видны коаксиальный выход для контроля напряжения, триаксиальный вход SMU и входной разъем для кабеля, подсоединяемого к модулю WGFMU

Модуль WGFMU не только может генерировать сигналы произвольной формы, но также и очень быстро измерять ток или напряжение в любой точке этих сигналов. Кроме этого, мощные измерительные возможности модуля WGFMU позволяют пользователю динамически изменять диапазон измерения с целью оптимизации их точности. И конечно, пользователь может также указать частоту дискретизации и время усреднения. Все эти характеристики иллюстрирует следующая диаграмма.



**Рис. 5.29.** Главной особенностью модуля WGFMU является способность измерить значение генерируемого сигнала произвольной формы в любой его точке

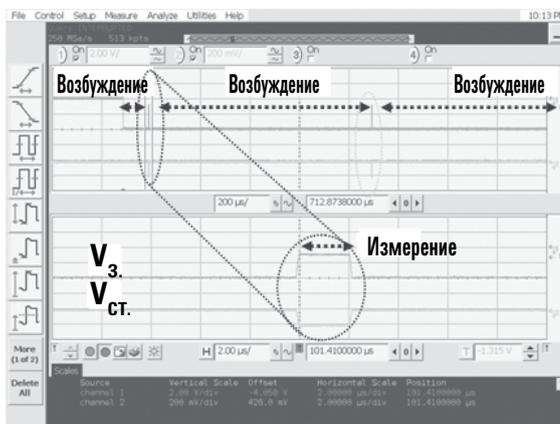
Ниже представлены результаты измерений зависимости  $I_{ст.} - V_3$ , выполненных с помощью модуля WGFMU в трех разных условиях измерения.



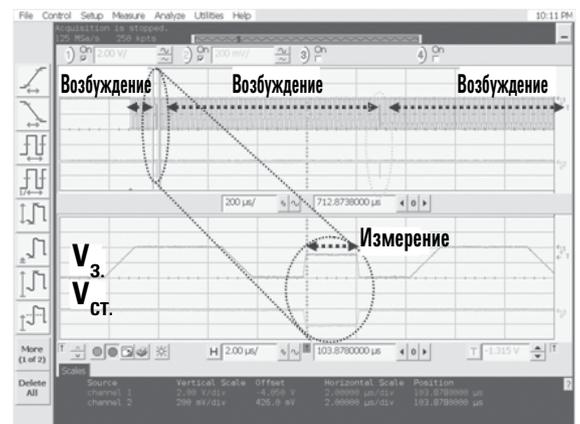
**Рис. 5.30.** Быстрые импульсные измерения зависимости  $I_{ст.} - V_3$  ( $\sim 1$  мкс на выборку), выполненные с помощью модуля WGFMU, хорошо коррелируются с более медленными неимпульсными измерениями

В качестве отправной точки вначале проводятся измерения со ступенчатым свипированием с шагом 100 мс (задержка 50 мс). Затем выполняются измерения со ступенчатым свипированием с шагом 1 мс (задержка 500 нс). И наконец, выполняются импульсные свипирующие измерения с импульсом длительностью 1 мс (длительность переднего/заднего фронта 100 нс, задержка 500 нс, период следования 2 мс). Результаты этих измерений подтверждают, что модуль WGF MU действительно может выполнять надежные высокоскоростные импульсные измерения.

Модуль WGF MU является идеальным решением многих задач тестирования надежности, требующих быстрых измерений. WGF MU способен не только очень быстро выполнять измерения, но и очень легко создавать сложные сигналы возбуждения переменным током с помощью встроенного линейного генератора сигналов произвольной формы. На следующем рисунке показаны примеры измерений надежности, выполняемых с помощью сигналов возбуждения постоянного и переменного тока.



**Возбуждение пост. током**



**Возбуждение пер. током (100 кГц, коэф. заполнения 50 %)**

**Рис. 5.31.** Модуль WGF MU генерирует сигналы возбуждения постоянного и переменного тока; при этом отсутствует задержка при переходе от возбуждения к измерению и не появляются глитчи

Преимущество модуля WGF MU заключается в отсутствии переходных процессов при переключении с возбуждения на измерение и обратно.

Как и для модуля HV-SPGU, компания Agilent Technologies предлагает библиотеки прикладных тестов для управления модулем WGF MU.

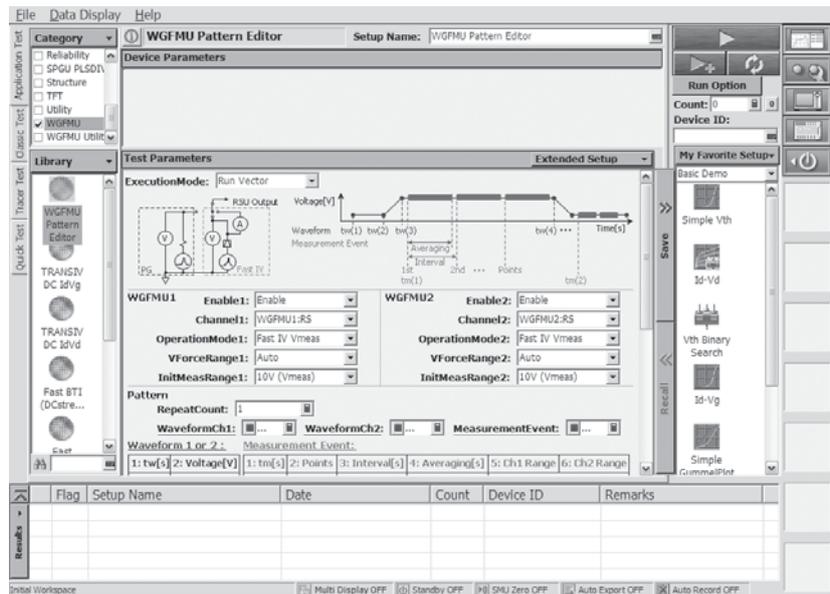


Рис. 5.31. Окно редактора сценария прикладного теста в ПО EasyExpert позволяет управлять модулем WGF MU

Модуль WGF MU идеально подходит для сверхбыстрого тестирования температурной нестабильности при отрицательном смещении (NBTI).

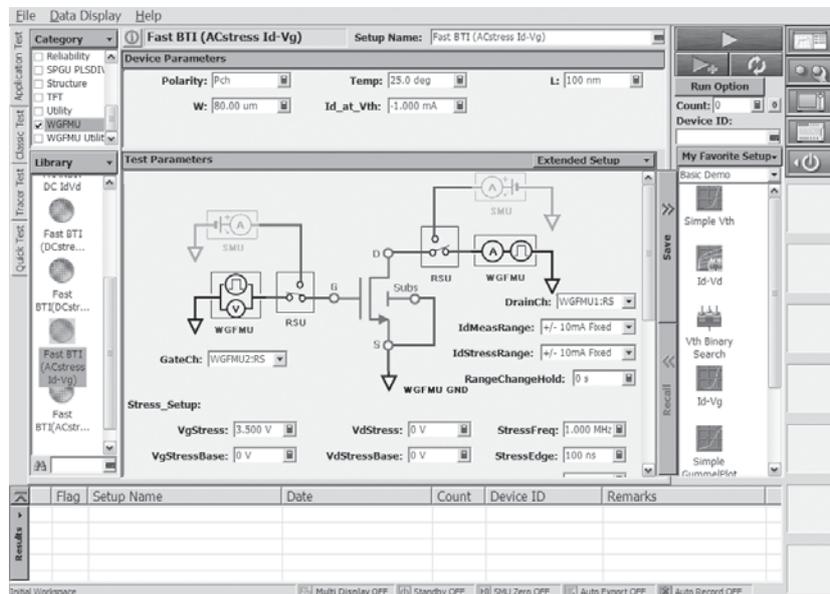


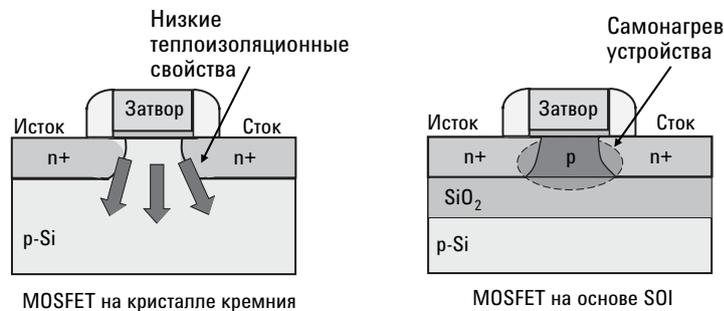
Рис. 5.33. Приложение для сверхбыстрого тестирования температурной нестабильности поставляется в двух версиях – с возбуждением постоянным или переменным током (здесь показана версия с возбуждением переменным током)

При более сложных сценариях возбуждения и измерения при тестировании надежности становится трудно управлять модулем WGF MU, используя прикладной тест, потому что нужно задавать большое количество параметров. В этих случаях лучше управлять анализатором B1500A удаленно с помощью внешнего контроллера и программного обеспечения. Компания Agilent Technologies готова поставить необходимые интерфейсы прикладных программ (API) для управления модулем WGF MU с помощью ПО сторонних разработчиков.

Решение для измерения ВАХ с помощью импульсов длительностью 10 нс  
 Решение Agilent Technologies для измерения ВАХ с помощью импульсов длительностью 10 нс (B1542A) разработано, чтобы удовлетворить самые взыскательные требования по измерению импульсных характеристик МОП транзисторов. Прежде чем приступить к детальному рассмотрению этого решения, стоит сначала понять, зачем оно понадобилось. Импульсные измерения ВАХ с длительностью импульса порядка 10 нс могут понадобиться в двух не связанных между собой случаях тестирования:

1. Тестирование МОП транзисторов, изготовленных по технологии «кремний на изоляторе» (SOI)
2. Тестирование МОП транзисторов, использующих в качестве подзатворного диэлектрика материал с высокой диэлектрической постоянной ( $k$ )

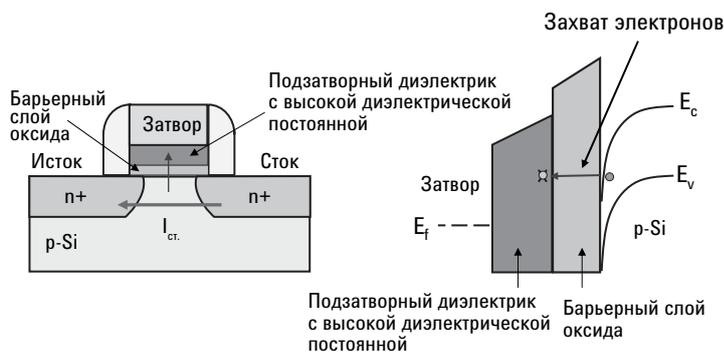
Объясним вкратце физические явления, лежащие в основе этих двух случаев. Диоксид кремния, используемый в МОП транзисторах на основе SOI, является чрезвычайно хорошим теплоизолятором. Это делает такие электронные приборы особенно чувствительными к последствиям самонагрева.



**Рис. 5.34.** МОП транзисторы на основе SOI не способны так легко рассеивать тепло, выделяемое при непрерывной работе, как МОП транзисторы, изготовленные на основе кристалла кремния

Тепло, выделяемое в процессе измерения параметров SOI-транзисторов постоянным током, уменьшает подвижность электронов в канале, что в свою очередь увеличивает напряжение открытия ( $V_{пор.}$ ) для МОП транзистора. Поскольку во время реальной работы цепи транзисторы постоянно открываются и закрываются, то измерения зависимости  $I_{ст.} - V_{з.}$  для SOI-МОП транзисторов не покажут правильной картины поведения устройства при работе. Тем не менее, транзисторы этого типа настолько чувствительны к нагреву устройства, что время включения должно быть очень коротким (порядка наносекунд) с коэффициентом заполнения  $\ll 0,1\%$ .

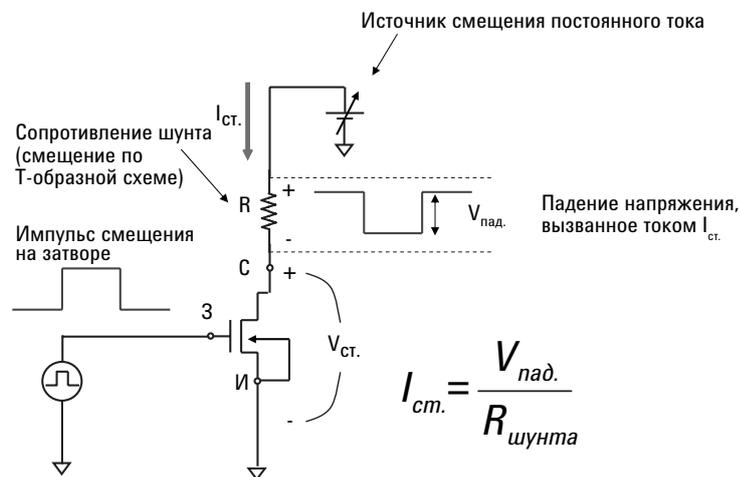
В МОП транзисторах, использующих в качестве подзатворного диэлектрика материал с высокой диэлектрической постоянной, может возникнуть захват электронов диэлектриком затвора.



**Рис. 5.35.** Транзисторы MOSFET, использующие в качестве подзатворного диэлектрика материал с высокой диэлектрической постоянной, допускают захват электронов в диэлектрике затвора

Электроны, попавшие в приграничные ловушки, будут работать против электрического поля, приложенного к затвору транзистора (по крайней мере, в случае n-канального MOSFET). В результате для включения транзистора по требуется приложить более высокое напряжение, что увеличивает напряжение включения ( $V_{пор.}$ ) для MOSFET транзистора. К счастью, такой захват электронов не является постоянным – его можно отменить (т.е. «отпустить» электроны), приложив отрицательное напряжение к затвору транзистора. Постоянная времени захвата/освобождения электронов составляет порядка 1 мкс, поэтому измерения  $I_{ст.}-V_{з.}$  должны быть выполнены за несколько наносекунд, чтобы этот эффект не успел проявиться.

Прежде чем продолжить, уточним, что решение Agilent Technologies для импульсных 10-наносекундных измерений ВАХ разработано специально для измерения характеристик МОП транзисторов в двух только что описанных случаях (использование технологии SOI и подзатворного диэлектрика с высокой диэлектрической постоянной). Его нельзя использовать для других типов импульсных измерений ВАХ. Однако большинство остальных импульсных измерений ВАХ могут быть выполнены с помощью описанных ранее модулей HV-SPGU или WGFMU. Базовая схема решения Agilent Technologies для измерения ВАХ с помощью импульсов длительностью десять наносекунд показана ниже.



**Рис. 5.36.** Базовая схема решения Agilent Technologies для измерения ВАХ с помощью импульсов длительностью 10 наносекунд

Хотя концепция такого решения довольно проста, но как отмечалось ранее, его практическая реализация может оказаться крайне затруднительной из-за использования внешних приборов. По этой причине компания Agilent Technologies в качестве готового решения для таких измерений разработала решение V1542A. Данное решение доступно с различными опциями и поддерживает ряд анализаторов полупроводниковых приборов, осциллографов и импульсных генераторов. Вы можете работать с этим решением с помощью ПО EasyEXPERT, установленного на B1500A, или с помощью ПО Desktop EasyEXPERT, установленного на внешнем ПК. Основные компоненты обоих решений показаны на рисунке ниже.



1. Поддерживаемые осциллографы: серия 54850, серия MSO8000A, серия DSO8000A, серия DSO80000B, серия DSO90000A
2. Поддерживаемые импульсные генераторы: 8110A, 81101A, 81110A

**Рис. 5.37.** Решение V1542A для импульсных 10-наносекундных измерений ВАХ с использованием B1500A в качестве системного контроллера

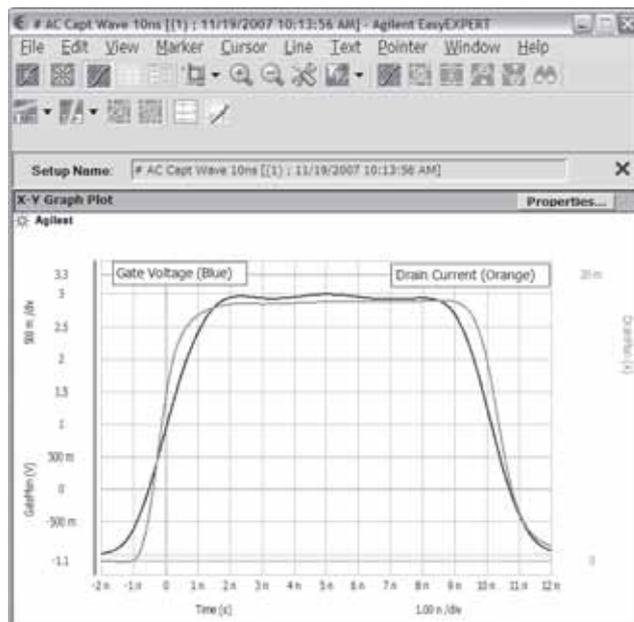


1. Поддерживаемые анализаторы: 4155B/C, 4156 B/C, E526xA, E5270B, B1500A
2. Поддерживаемые осциллографы: серия 54850, серия MSO8000A, серия DSO8000A, серия DSO80000B, серия DSO90000A
3. Поддерживаемые импульсные генераторы: 8110A, 81101A, 81110A

**Рис. 5.38.** Решение V1542A для импульсных 10-наносекундных измерений ВАХ с использованием внешнего ПК с ПО Desktop EasyEXPERT

Конечно, если вы уже имеете какие-либо или все из поддерживаемых приборов, то все, что вам нужно – это купить программное обеспечение V1542A, кабели и разъемы. Заметим, что в качестве опции доступен коммутатор, позволяющий переключаться между стандартным измерением ВАХ с помощью SMU и импульсным измерением ВАХ с помощью импульсного генератора и осциллографа без подсоединения и отсоединения каких-либо кабелей.

В анализаторе V1542A предусмотрена функция, позволяющая проверить форму напряжения на затворе и форму тока стока. Выбрав и запустив этот прикладной тест, вы сможете увидеть форму импульса, как если бы вы проводили измерения на осциллографе. Тест позволяет легко проверить, насколько искажается форма импульсов, которые вы создаете и измеряете. На следующем рисунке показаны импульсы, реально захваченные с помощью решения V1542A.



**Рис. 5.39.** Сигналы напряжения на затворе и стоке, полученные с помощью решения V1542A для импульсного измерения ВАХ, представляют собой импульсы длительностью 10 нс с очень короткими перепадами

Как видно, качество импульсов превосходное. Длительность переднего и заднего перепадов составляет около 2 нс, а длительность самого импульса – 10 нс.

Прикладной тест для выполнения импульсных измерений ВАХ показан ниже.

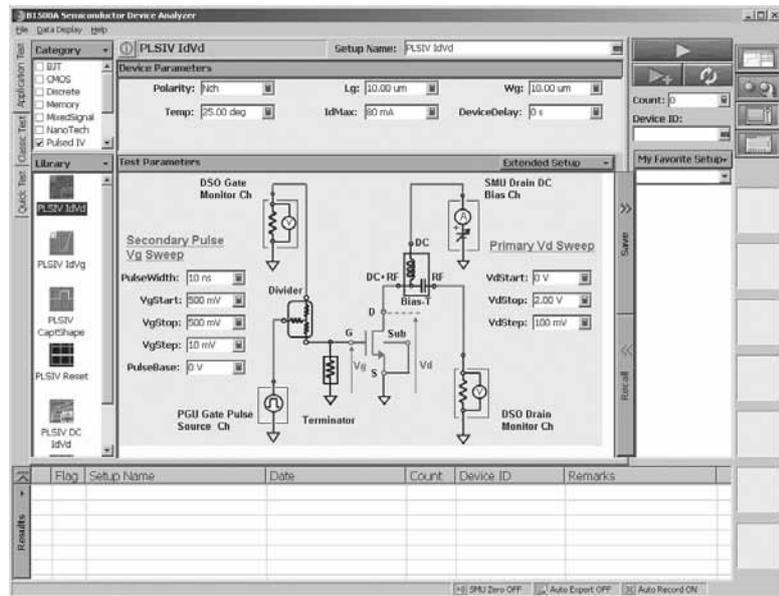


Рис. 5.40. Прикладной тест для измерения ВАХ  $I_{ct}-V_{ct}$  10-наносекундным импульсом с помощью B15421A

Определить точность импульсного измерения можно одним простым способом: нужно сравнить результаты измерения ВАХ обычного транзистора, полученные при импульсном измерении, с результатами, полученными с помощью SMU. Так как обычному транзистору не свойственны проблемы, связанные с самонагревом или с захватом электронов, то результаты двух измерений должны быть одинаковыми. Два указанных типа измерений ВАХ  $I_{ct}-V_{ct}$  обычного транзистора сравниваются на рисунке ниже.

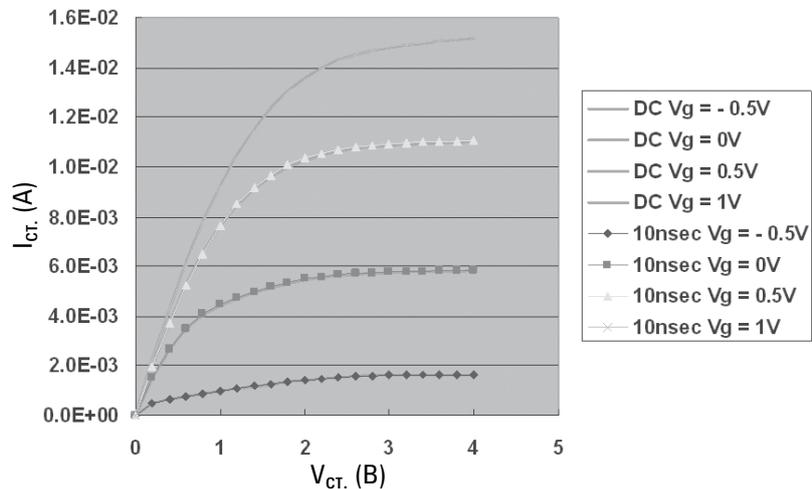


Рис. 5.41. Вольт-амперная характеристика  $I_{ct}-V_{ct}$  обычного транзистора, полученная с помощью импульсного решения, хорошо корректируется с результатами измерений, полученных с помощью SMU

Можно сделать вывод, что измерения, выполненные с помощью B1542A дают точно такие же результаты, что и измерения, выполненные с помощью SMU. Это подтверждает, что импульсные измерения вольт-амперных характеристик электронных приборов, в которых возникают проблемы, связанные с самонагревом или с захватом электронов, позволяют получить достаточно точные результаты.

### Решения Agilent Technologies для импульсных измерений ВАХ. Выводы

Разнообразие предлагаемых вариантов заставляет при выборе импульсных измерений ВАХ внимательно проанализировать ряд факторов. Приведенная ниже последовательность действий поможет вам в этом процессе.

1. Убедитесь, что вы понимаете, какие требования предъявляются к измерениям. Главными из них являются:
  - Диапазон длительностей импульса
  - Требуемая разрешающая способность при измерении тока
  - Максимальное выходное напряжение и ток
  - Поддержка многоканальных импульсных измерений
  - **Примечание.** Имейте в виду, что некоторые решения работают только с конкретными конфигурациями и типами устройств.
2. Определите, какое решение или решения удовлетворяют вашим требованиям к импульсным измерениям, принимая во внимание ваши будущие и текущие потребности.
3. Если этим требованиям отвечает более чем одно решение, то выберите наиболее подходящее по другим параметрам (разрешающая способность измерения тока, значение выходного тока/напряжения и т. д.). Пожалуйста, имейте в виду, что иногда придется искать компромиссы между параметрами (например, между точностью и значением выходного тока/напряжения).
4. Найдя решение, повторно проверьте все его характеристики, чтобы убедиться, что оно соответствует требованиям, предъявляемым к измерению потребностей вашего приложения и устройства.

Как мы обсуждали ранее в этой главе, импульсные измерения можно выполнять и с помощью SMU. Хотя импульсные измерения с помощью SMU не такие быстрые по сравнению с тремя решениями, рассмотренными в этом разделе, в некоторых случаях (как, например, измерение NBTI «на лету») импульсные измерения с помощью SMU могут обеспечить вполне удовлетворительное и экономически эффективное решение. Поэтому SMU всегда следует рассматривать в качестве возможного решения для импульсных измерений. Основные технические характеристики решений Agilent Technologies для импульсных измерений приведены в следующей таблице.

Решение для импульсного измерения	SMU	HV-SPGU	WGFMU	10 нс импульсная ВАХ (B1542A)
Поддерживаемые приборы	4155, 4156, B1500A	B1500A	B1500A	4155, 4156, E526xA, E5270B, B1500A
Максимальное напряжение	100 В <sup>1,2</sup> /200 В <sup>3</sup>	± 40 В	От -10 В до 0 В или от 0 В до 10 В	4,5 В (на затворе) 10 В (на стоке)
Максимальный ток	100 мА <sup>1,2</sup> /1 А <sup>3</sup>	400 мА	10 мА	80 мА
Разрешение по току	1 фА <sup>2</sup> /10 фА <sup>1,3</sup>	40 мА	0,014 % диапазона <sup>4</sup>	1 мА
Диапазон длительности импульсов	500 мкс - 2 с	5 мкс - 10 с	100 нс (мин.) <sup>5</sup>	10 нс – 1 мс
Поддержка измерений с помощью SMU	Да	Нет	Да	Да (с помощью 11713B)
Функция наблюдения формы сигналов	Нет	Нет	Да	Да
Многоканальный импульсный режим	Нет	Да	Да	Нет
Требуемое внешнее оборудование	Не требуется	Не требуется	Не требуется	Осциллограф и модуль PGU <sup>6</sup>
Подсоединение	Прямое	Прямое	Прямое	Смещение по Т-образной схеме / разветвитель

1. MPSMU

2. HRSMU

3. HPSMU

4. Требуется усреднение, см. техническое описание.

5. Для этого модуля трудно определить максимальную длительность импульса, но она может легко достичь 20 миллионов секунд (практически бесконечность).

6. Поддерживаемые осциллографы: серии 54850, MSO8000A, DSO8000A, DSO80000B, DSO90000A.

Поддерживаемые генераторы импульсов: 8110A, 81101A, 81110A.

## Глава 6. Точное измерение сопротивления

*Чтобы анализировать очевидное, нужен очень необычный ум.*

Альфред Норт Уайтхед

### Основы измерения сопротивления

Сначала я подумал, что может показаться странным посвятить главу измерению сопротивления. По сравнению с другими параметрами, сопротивление определяется самым простым из всех правил – законом Ома, который в первую же неделю занятий становится известен любому изучающему электротехнику:

$$V = I \times R \quad (\text{Уравнение 6.1})$$

Однако несмотря на простоту этого уравнения, оказывается, что точное измерение сопротивления на самом деле – одна из наиболее сложных областей параметрического тестирования. Причина заключается в том, что это уравнение слишком упрощено и игнорирует тот факт, что сопротивление генерирует тепло, которое, в свою очередь, сказывается на значении сопротивления. Поэтому более правильным было бы представить это уравнение так:

$$V = I \times R(T) \quad (\text{Уравнение 6.2})$$

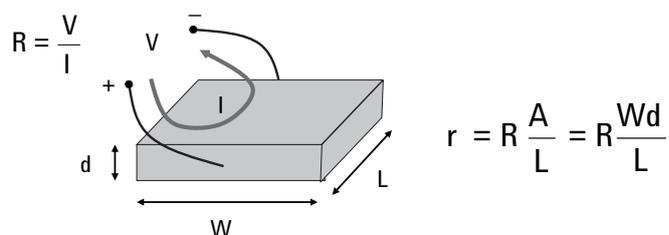
Здесь сопротивление ( $R$ ) является функцией температуры ( $T$ ). Это явление, при котором фактическое значение измеряемого сопротивления изменяется за счет тепла, генерируемого протекающим током, обычно называют тепловым эффектом Джоуля.

Еще одним фактором, требующим рассмотрения, является сопротивление самих кабелей, используемых для измерения сопротивления. При измерении очень малых значений сопротивления следует применять четырехпроводную схему Кельвина. Положения теории четырехпроводных измерений были описаны в предыдущих главах и теперь нужно просто применить их для измерения резисторов. Тем не менее стоит отметить, что воздействие эффекта Джоуля и сопротивления кабеля делают измерения резисторов особенно сложной задачей. Чтобы уменьшить тепловую энергию, вызванную эффектом Джоуля, следует уменьшить ток (мощность), протекающий через измеряемый резистор. Однако небольшие токи, протекающие через сопротивление кабеля, требуют измерительного оборудования, позволяющего измерять напряжения с очень высокой точностью. Только это позволит отличить падение напряжения на кабеле от падения напряжения на измеряемом резисторе. В силу этого, измерения резисторов могут потребовать разрешающей способности по напряжению менее 1 милливольт.

Последний фактор, учитываемый при проведении измерений сопротивления – это электродвижущая сила (ЭДС). В данном случае под ЭДС подразумеваются коммутационные помехи, генерируемые в момент размыкания или замыкания контактов электромеханических реле. Все SMU имеют электромеханические (герконовые) реле на выходе, которые генерируют ЭДС, когда SMU активируются. Эта ЭДС может оказывать существенное влияние на точность всех видов измерений, но особенно сильно она сказывается на точности измерения малых сопротивлений, поскольку при этом требуется чрезвычайно высокое разрешение измерения напряжения.

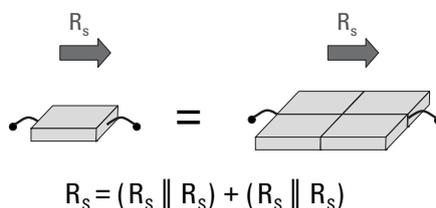
## Удельное сопротивление

Удельное сопротивление является основным свойством материала. Если мы измеряем ток, протекающий через полоску однородного материала с постоянным поперечным сечением, когда к нему приложено напряжение, то мы можем определить его сопротивление по формуле  $R = V/I$ . Удельное сопротивление может быть рассчитано на основе полученного значения сопротивления, если площадь поперечного сечения (ширина  $\times$  глубина) и длина образца определены, как показано ниже.



**Рис. 6.1.** Вычисление удельного сопротивления на основе результата измерения сопротивления

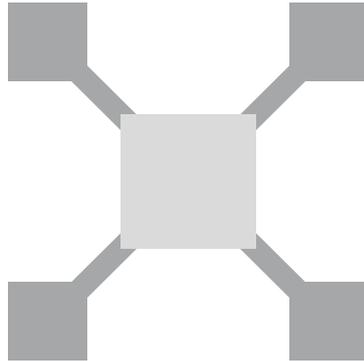
Как правило, удельное поверхностное сопротивление измеряется для всех имплантированных слоев, а также для металлизированных межсоединений. Очень часто удельное сопротивление выражается в омах на квадрат или Ом/д. Это связано с тем, что сопротивление квадратного слоя однородного материала постоянной толщины не зависит от величины стороны квадрата. Если немного поразмыслить о том, что происходит при объединении пленок квадратной формы одинаковой толщины в большой квадрат, то читатель сможет убедиться, что данное утверждение верно.



**Рис. 6.2.** Поверхностное сопротивление, выраженное в омах на квадрат, для однородного материала одинаковой толщины всегда одинаково и не зависит от размера квадрата

## Тестовые структуры Ван дер Пау

Поскольку результаты измерений удельного сопротивления могут иметь очень малую величину (порядка нескольких миллиом), следует обязательно использовать четырехпроводную схему. Таким образом, для определения поверхностного сопротивления пленки материала чрезвычайно удобно объединить метод измерения Кельвина с простой геометрией размещения зондов (по углам квадрата). Данная универсальная конфигурация, называется структурой Ван дер Пау в честь ученого (L.J. Van der Pauw), который первым предложил этот способ измерения в 1958 году. Структура Ван дер Пау состоит из квадратного образца с электрическими контактами в каждом из углов, как показано ниже.

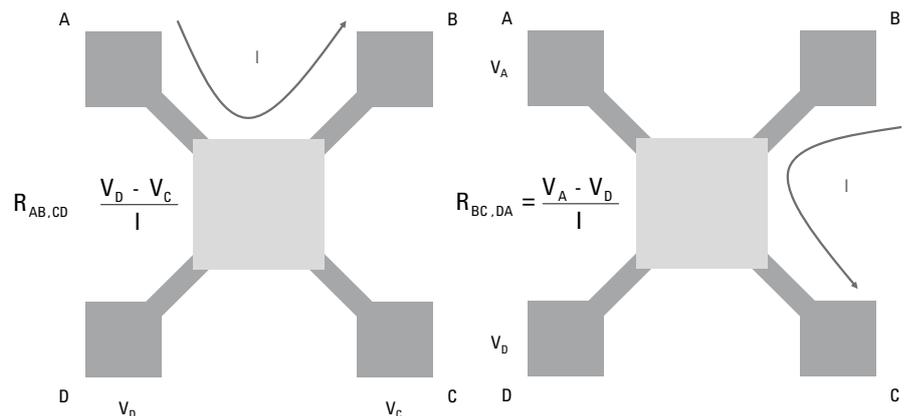


**Рис. 6.3.** Структура Ван дер Пау для определения удельного сопротивления

В своей оригинальной работе Ван дер Пау показал, что выполняется следующее соотношение:

$$\exp \frac{-\pi d R_{AB,CD}}{\rho} + \exp \frac{-\pi d R_{BC,DA}}{\rho} = 1$$

Здесь  $d$  – толщина образца, а  $\rho$  – его поверхностное сопротивление. Измерение сопротивления проводится в соответствии с приведенной ниже схемой.



**Рис. 6.4.** Вычисление поверхностного сопротивления с помощью структуры Ван дер Пау

Проведение измерений и вычисление удельного сопротивления не вызывает затруднений.

## Учет воздействия самонагрева, вызванного эффектом Джоуля

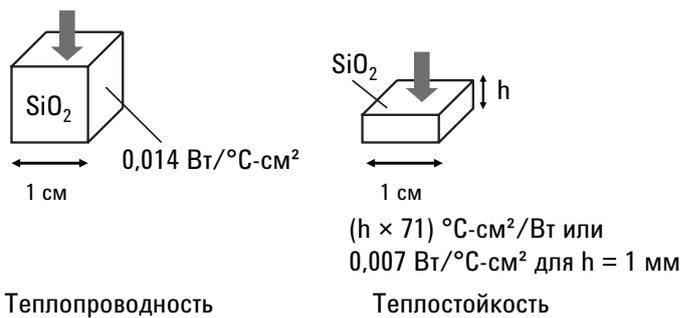
Самонагрев, вызванный эффектом Джоуля, ограничивает точность измерения сопротивления, потому что из-за нагрева меняется значение измеряемого сопротивления. Однако выбрав максимально возможный уровень изменения сопротивления, можно перевести его в максимально допустимую мощность рассеивания. Мы знаем, что мощность, рассеиваемая на резисторе, определяется уравнением:

$$P = V \times I = V \times \frac{V}{R} = \frac{V^2}{R}$$

Преобразовав вышеприведенное уравнение и решив его относительно напряжения, мы можем преобразовать максимальную мощность рассеивания в минимально допустимое напряжение по напряжению, соответствующее требованиям к измерению сопротивления. В результате получим следующее уравнение:

$$V_{max} = \sqrt{P_{max} \times R(T)}$$

Проиллюстрируем работу этого процесса простым примером. Максимально допустимая рассеиваемая мощность определяется теплостойкостью слоя, лежащего под слоем диоксида кремния. Теплопроводность диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) составляет  $0,014 \text{ Вт/}^\circ\text{C}\cdot\text{см}^2$ . Мы используем это значение для вычисления теплостойкости:



**Рис. 6.5.** Тепловые свойства диоксида кремния

Это означает, что если вы подведете мощность 1 Вт к металлическому квадратному образцу со стороной 1 см и с такой же толщиной, то его температура повысится на 0,007 °С. Но если вы приложите 1 Вт к металлической структуре квадратного сечения со стороной 1 мкм и с прежней толщиной, то температура повысится до 7000 °С. Конечно, в данном примере слой материала над SiO<sub>2</sub> испарится задолго до того, как температура достигнет 7000 °С. Этот пример приведен здесь с целью подчеркнуть тот факт, что нельзя произвольно увеличивать мощность (или протекающий ток) на измеряемом резисторе, пытаясь скомпенсировать недостаточную точность измерительного оборудования. При комнатной температуре или вблизи нее сопротивление полосок меди и алюминия изменяется примерно на 0,35 %/°С. В вышеприведенном случае мы можем вычислить максимальную рассеиваемую мощность, достаточную, чтобы изменить на 0,1 % сопротивление медных или алюминиевых полосок размером 10 x 10 мм.

$$0,1 \% = P_{\text{макс.}} \times 0,007 \text{ } ^\circ\text{C}\text{-см}^2\text{/Вт} \times 0,35 \% / ^\circ\text{C} \times 1 / (10 \text{ мм})^2 \times (10 \text{ мм} / 1 \text{ см})^2,$$

$$P_{\text{макс.}} = 0,04 \text{ мВт}$$

Для достижения точности, равной 0,1 %, в медной структуре Ван дер Пау с эквивалентным сопротивлением 10 МОм на квадрат (для пленки толщиной 1 мм) мы получаем следующие результаты:

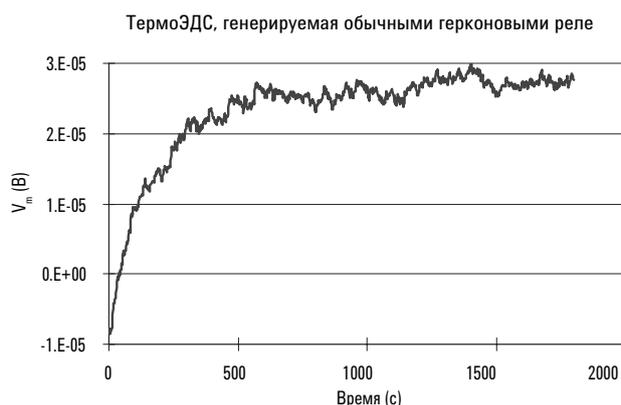
$$V_{\text{макс.}} = \sqrt{(0,04 \text{ мВт}) \times (10 \text{ МОм})} \approx 0,000632 \text{ В}$$

Иными словами, измерительные приборы должны иметь разрешение до 1 мВ!  
**Примечание.** Структура Ван дер Пау – довольно требовательный пример. Для металлической полоски шириной 1 мм и длиной 100 мм, как правило, требуется, чтобы для достижения точности измерения сопротивления 0,1 % разрешение измерительных приборов по напряжению составляло десятки микровольт. Поскольку мы знаем, что максимально допустимое напряжение пропорционально корню квадратному из ( $P_{\text{макс.}} \times R$ ), то требуемое разрешение по напряжению возрастает пропорционально корню квадратному из значения сопротивления. Поскольку это относительно слабая зависимость от R, то значение 10 мВ является хорошей разрешающей способностью по напряжению для большинства измерений сопротивления.

## Устранение воздействия электродвижущей силы (ЭДС)

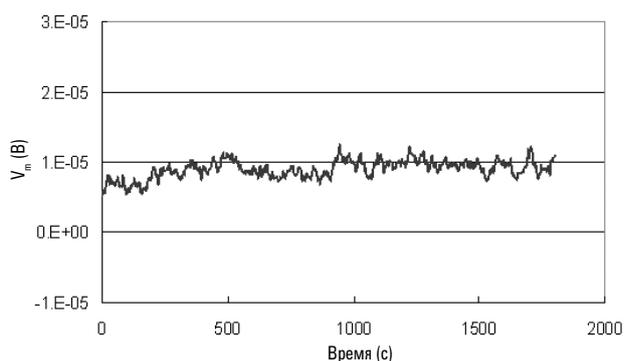
### Что такое ЭДС?

В нашем случае электродвижущей силой (ЭДС) мы называем импульсы переходного напряжения, возникающего при замыкании и размыкании герконовых реле. В обычных герконовых реле, используемых в различном оборудовании, при коммутации контактов термоЭДС составляет от нескольких десятков до сотен микровольт. Такое переходное напряжение, которое может существовать несколько минут, неприемлемо для прецизионных измерений, например, при параметрическом тестировании. На представленном ниже рисунке показана термоЭДС, генерируемая обычными герконовыми реле.



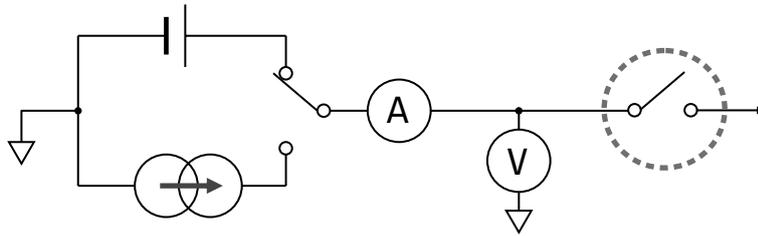
**Рис. 6.6.** ТермоЭДС, генерируемая обычными герконовыми реле

Важно отметить, что по понятным причинам приведенный выше график не характерен для герконовых реле, используемых в параметрических измерительных приборах. Компания Agilent Technologies разработала герконовые реле Cool Guard на основе собственной технологии. Данные реле используются в оборудовании для параметрических измерений, позволяя свести к минимуму воздействие ЭДС и тем самым повышая эффективность и точность измерений. Временная характеристика термоЭДС реле Cool Guard приведена ниже.



**Рис. 6.7.** ТермоЭДС, генерируемая реле Cool Guard от Agilent Technologies

Для упрощения, на приведенной в главе 3 схеме SMU не было показано выходное реле. Однако важно понять, что все SMU оборудованы таким реле на выходе, и что при их коммутации возникает ЭДС. Ниже показана уточненная схема SMU.



**Рис. 6.8.** Схема SMU с выходным реле

При управлении SMU с передней панели прибора, размыкание и замыкание этого реле осуществляется с помощью встроенного программного обеспечения без участия пользователя. Однако при использовании приборов, управляемых внешним ПО, пользователь должен выдать команду на замыкание этого реле (CN). Реле останется замкнутым, пока не будет выдана команда на размыкание (\*RST).

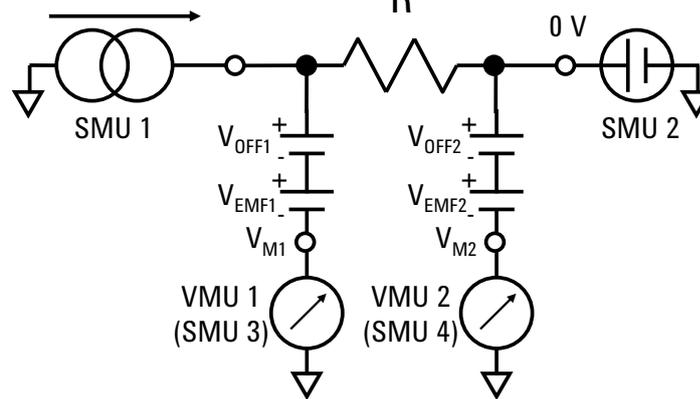
#### *Устранение вредного воздействия ЭДС*

Снижение воздействия ЭДС на параметрические измерения относительно прозрачно. Следует отметить, что воздействие ЭДС уже учтено что в технических характеристиках прибора, так что при измерении в нормальных условиях вам не нужно об этом беспокоиться. Однако при сверхчувствительных измерениях или необходимости повысить точность измерения вашего параметрического измерительного оборудования нужно минимизировать или устранить влияние термоЭДС. Выполните следующие указания:

1. Убедитесь, что выход реле замкнут и стабилизировался в этом положении. Это означает, что прибор следует прогреть и что при этом выходное реле SMU должно оставаться замкнутым.
2. Выполняйте измерения как можно быстрее (менее чем за 10 секунд). При этом измеряемое напряжение изменится не более, чем на несколько микровольт.

Рассмотрим методику измерения сопротивления, в которой устранено влияние на как ЭДС, так и любого напряжения смещения. Она состоит в том, чтобы возбуждать ток и измерять сопротивление по четырехпроводной схеме дважды, изменив полярность тока возбуждения при втором измерении. Составив для этой схемы уравнения на основе закона Кирхгофа для токов и напряжений, можно убедиться, что при усреднении результатов двух измерений значения напряжения смещения и ЭДС будут исключены и вы получите истинное значение сопротивления.

Ток возбуждения подается дважды с разной полярностью



**Рис. 6.9.** Если измерить сопротивление дважды и усреднить полученные значения, то влияние ЭДС и напряжения смещения будет устранено

$$R = \frac{(V_{M1} - V_{M2})}{I_F}$$

В заключение отметим ключевые моменты описанной выше методики.

1. Убедитесь, что вы прикладываете достаточно слабый ток, чтобы исключить самонагрев, определяемый законом Джоуля.
2. Измерьте сопротивление дважды, изменяя полярность подаваемого тока, и усредните два результата.
3. Для измерения напряжения лучше использовать вольтметр, а не SMU, поскольку вольтметры, как правило, имеют более высокую точность измерения.

# Глава 7. Измерение характеристик диодов и транзисторов

*Выберите работу, которую вы любите, и вам не придется работать ни одного дня в своей жизни.*

Конфуций

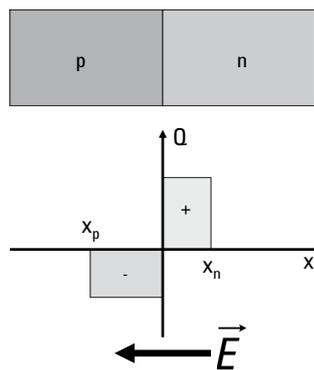
## Введение

Физика полупроводников в данном пособии не рассматривается, поскольку ей посвящено множество превосходных учебников. Однако трудно обсуждать параметрические измерения диодов и транзисторов, не потратив вначале немного времени, чтобы вспомнить как они работают. Поэтому мы вкратце, не вдаваясь в теоретические рассуждения, обсудим р-п переходы, диоды, МОП и биполярные транзисторы, обращая внимание на характеристики, которые будем измерять при параметрическом тестировании.

## Диоды и р-п переходы

### Работа р-п диодов

Сами по себе полупроводниковые материалы (например, как кремний) не имеют избытка электронов или дырок. Однако кремний можно легировать другими материалами, в результате чего он становится или полупроводником n-типа (с избытком электронов) или р-типа (с избытком дырок). Каждый такой материал по отдельности не представляет интереса. Рассмотрим изображенный ниже случай, когда эти два материала находятся в тесном контакте.



**Рис. 7.1.** Сечение р-п перехода со скачкообразным переходом от слоя с р-проводимостью к слою с n-проводимостью. На графике показан установившийся заряд, после того как диффузия подвижных носителей стабилизировалась

Рассматривая показанный на рис. 7.1 идеальный случай скачкообразного перехода (при котором переход от р- к n-материалу происходит мгновенно), мы обнаружим интересное явление. Силы диффузии заставляют дырки из материала р-типа перетекать в материал n-типа (при этом в исходном материале образуется фиксированный отрицательный заряд). Точно так же силы диффузии заставляют электроны из материала n-типа перетекать в материал р-типа (при этом в исходном материале образуется положительный заряд). Процесс диффузии будет продолжаться до тех пор, пока электрическое поле, создаваемое фиксированным зарядом в зоне, которую обычно называют областью пространственного заряда, становится достаточным для уравнивания процесса диффузии подвижных носителей.

Ниже представлены одномерные уравнения (для оси X), определяющие плотность тока в полупроводнике.

$$J_n = q\mu_n E_x + qD_n \frac{dn}{dx} \quad (\text{Уравнение 7.1})$$

$$J_p = q\mu_p E_x - qD_p \frac{dp}{dx} \quad (\text{Уравнение 7.2})$$

Где  $J$  – плотность тока электронов (n) и дырок (p)  
 $q$  – заряд электрона  
 $E_x$  – напряженность электрического поля по оси x  
 $\mu$  – подвижность электронов (n) и дырок (p)  
 $D$  – коэффициент диффузии для электронов (n) и дырок (p)  
 $n$  – плотность электронов  
 $p$  – плотность дырок

Эти уравнения основаны на предположении существования скачкообразного перехода, о котором упоминалось ранее. Плотность тока в полупроводниках определяется двумя составляющими: током дрейфа, пропорциональным приложенному электрическому полю, и током диффузии, пропорциональным первой пространственной производной от плотности подвижных носителей. В дополнение к этим уравнениям плотности тока можно воспользоваться соотношением Эйнштейна, которое связывает коэффициент диффузии и подвижность, как показано ниже.

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q} \quad (\text{Уравнение 7.3})$$

Где  $q$  – заряд электрона ( $1,602 \times 10^{-19}$  кулон)  
 $k$  – постоянная Больцмана ( $1,38 \times 10^{-23}$  Дж/к)  
 $T$  – абсолютная температура [градусы Кельвина]

Уравнение Пуассона в общем виде связывает вторую производную электрического потенциала с плотностью суммарного объемного заряда ( $\rho$ ). Поскольку известно, что в полупроводниках эта величина должна быть связана с плотностью подвижных и неподвижных зарядов, то можно представить это следующим образом.

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon_{Si}} (p - n + N_d - N_a) \quad (\text{Уравнение 7.4})$$

Где  $N_d$  – концентрация доноров  
 $N_a$  – концентрация акцепторов  
 $\epsilon_{Si}$  – диэлектрическая проницаемость кремния

Для случая скачкообразного перехода, показанного на рис. 7.1, мы используем так называемое приближение пространственного заряда, которое предполагает, что полупроводник разделен на отдельные области, которые либо полностью нейтральны, либо полностью обеднены подвижными носителями. Таким образом, для обедненной области мы можем переписать вышеприведенное уравнение следующим образом.

$$\frac{d^2 \varphi}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon_{Si}} (N_d - N_a) \quad (\text{Уравнение 7.5})$$

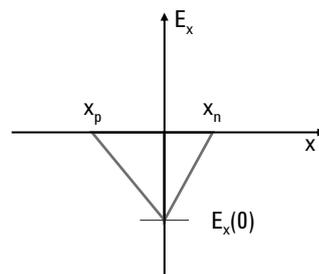
Используя приближение пространственного заряда, проинтегрируем вышеприведенное уравнение, чтобы получить значение напряженности электрического поля в р- и n-областях:

$$E_x(x) = -\frac{qN_a}{\epsilon_{Si}}(x + x_p) \quad -x_p \leq x \leq 0 \quad (\text{Уравнение 7.6})$$

$$E_x(x) = -\frac{qN_d}{\epsilon_{Si}}(x_n - x) \quad 0 \leq x \leq x_n \quad (\text{Уравнение 7.7})$$

Где  $x_p$  – ширина области пространственного заряда в р-области (см. рис. 7.1)  
 $x_n$  – ширина области пространственного заряда в n-области (см. рис. 7.1)

Это выражение можно представить в виде следующего графика.



**Рис. 7.2.** Электрическое поле в скачкообразном переходе при условии использования приближения пространственного заряда

Известно, что при  $x = 0$  напряженность электрического поля должна быть постоянной.

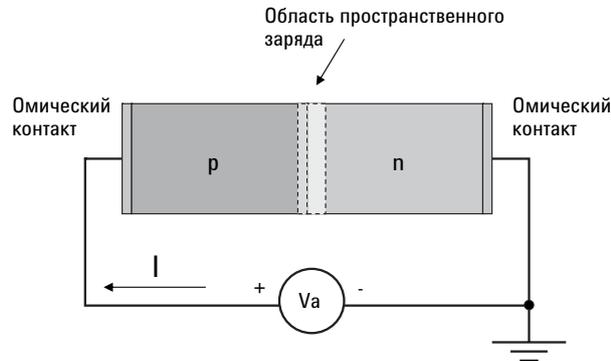
$$E_x(0) = -\frac{qN_d x_n}{\epsilon_{Si}} = -\frac{qN_a x_p}{\epsilon_{Si}} \quad (\text{Уравнение 7.8})$$

Отсюда следует, что

$$N_d x_n = N_a x_p \quad (\text{Уравнение 7.9})$$

Уравнение 7.9 отражает важную характеристику р-п переходов: ширина обедненной области меняется обратно пропорционально величине концентрации примеси. Иными словами, чем выше концентрация примеси, тем уже область пространственного заряда.

Если к р-п-переходу не приложено напряжение, то существует барьер, препятствующий протеканию тока, и диод представляет собой разомкнутую цепь. Вывод уравнений, описывающих плотность тока, достаточно сложен и выходит за рамки данного материала. Однако интуитивно можно понять, что когда мы прикладываем положительное напряжение (т.е. электрическое поле) к р-области, то это приводит к уменьшению внутреннего электрического поля р-п перехода. И в какой-то точке электрическое поле уменьшается настолько, что через р-п переход начинает протекать ток.

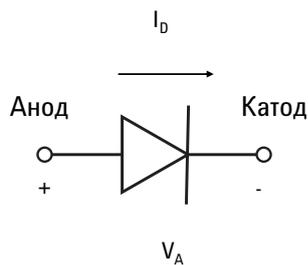


**Рис. 7.3.** Поведение р-п перехода при положительном смещении

Не будем приводить подробный вывод уравнения для тока, протекающего через р-п диод, а просто попросим читателя принять на веру то, что ток экспоненциально зависит от приложенного напряжения ( $V_a$ ), а уравнение выглядит следующим образом.

$$I = I_o \left( e^{\left( \frac{qV_a}{kT} \right)} - 1 \right) \quad (\text{Уравнение 7.10})$$

Это уравнение иногда называется уравнением идеального диода. Из него следует, что ток достигает значения насыщения  $-I_o$  при отрицательных значениях  $V_a$ , а при положительных значениях  $V_a$  ток экспоненциально возрастает. Чтобы подчеркнуть, что диод проводит ток только в одном направлении, его изображают следующим символом.



**Рис. 7.4.** Условное обозначение диода на схеме

p-область с донорными примесями называется анодом, а n-область с акцепторными примесями – катодом. **Примечание.** В действительности диоды могут проводить ток в обоих направлениях. Но как правило, чтобы ток протекал в обратном направлении, к катоду (по сравнению с анодом) нужно приложить гораздо большее напряжение. При этом диод переходит в состояние, называемое пробоем и являющееся аномальным режимом работы диода. Физика пробоя p-n перехода в данном документе не обсуждается, но позднее мы обсудим ряд практических примеров измерений.

Термин «омические контакты» выводов диода на рис. 7.3 просто указывает на то, что степень легирования полупроводникового материала такова, что переход металл-полупроводник не представляет собой препятствия для протекания тока. Если степень легирования полупроводникового материала мала, то переход металл-полупроводник может образовывать барьер и в результате получается диод другого типа, известного как диод с барьером Шоттки. Ниже приведена зависимость тока от напряжения в диоде Шоттки.

$$I = I'_o \left( e^{\left( \frac{qV_a}{nkT} \right)} - 1 \right) \quad (\text{Уравнение 7.11})$$

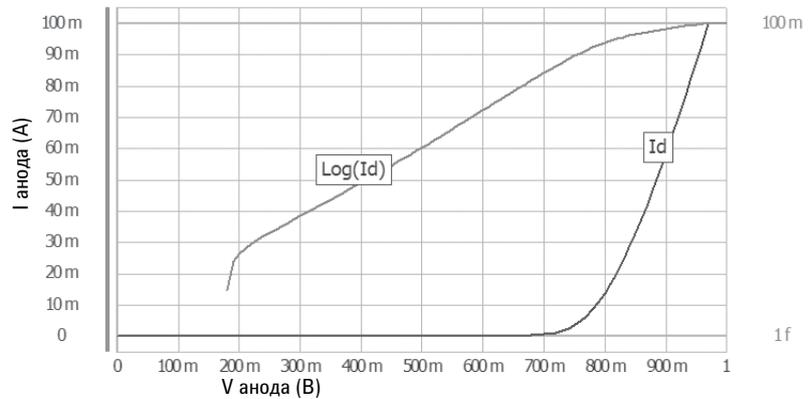
В уравнении 7.11 «n» является константой, значение которой составляет от 1,02 до 1,15. Знак апострофа (') над  $I_o$  подчеркивает, что эта константа отличается от аналогичной значения для диода с p-n переходом. Прямое напряжение на диоде Шоттки, как правило, на несколько сотен милливольт меньше, чем на диоде с p-n переходом, что позволяет использовать их в качестве основных элементов при проектировании логических схем на биполярных транзисторах, поскольку они защищают переход база-коллектор от прямого смещения и, следовательно, предотвращают насыщение транзистора.

Еще одно важное замечание относительно p-n перехода состоит в том, что он ведет себя как конденсатор с параллельными пластинами, емкость которого зависит от напряжения, поскольку при подаче внешних напряжений изменяется распределение зарядов внутри и вне области пространственного заряда. Поэтому емкость перехода является одним из важных параметров, который должен быть измерен для всех полупроводниковых приборов, поскольку он влияет на скорость коммутации устройств при работе в интегральной схеме.

Однако поскольку правильное измерение емкости является гораздо более сложной задачей, чем простые измерения тока и напряжения (ВАХ), то мы отложим подробное обсуждение измерения емкости полупроводников до главы 8.

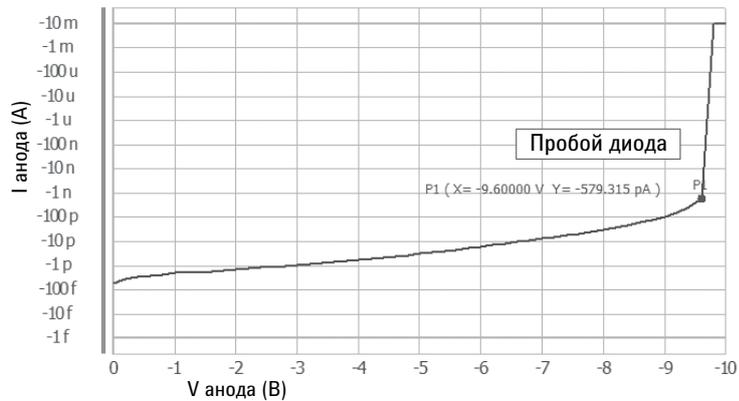
### Основные характеристики диода

Измерение характеристик диодов – довольно простая задача. Из уравнения 7.10 следует, что зависимость логарифма тока диода ( $I_d$ ) должна быть линейна относительно приложенного напряжения. Графики зависимостей тока диода и его логарифма от напряжения для «типичного» диода показаны ниже.



**Рис. 7.5.** Зависимости  $I_d$  и  $\text{Log}(I_d)$ , полученные при свипировании прямого напряжения на р-п диоде

Конечно, еще одним важным параметром является напряжение пробоя р-п диода при прикладывании обратного напряжения. Эта зависимость показана ниже.



**Рис. 7.6.** Пробой диода при прикладывании обратного напряжения.

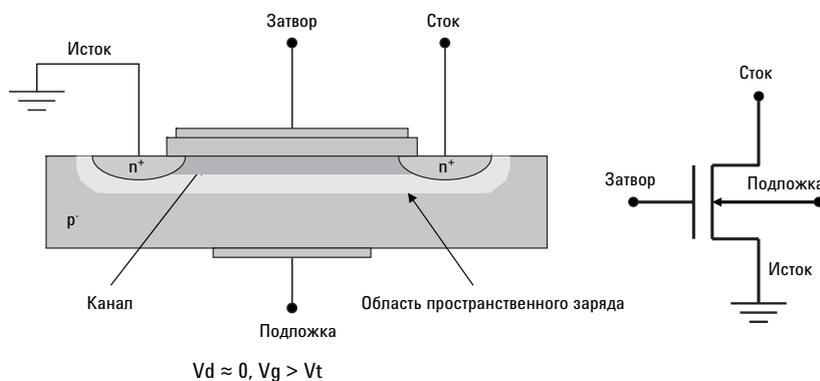
Используя определенные схемотехнические решения, можно очень точно управлять параметрами пробоя диодов некоторых классов. Такие диоды с точно контролируемыми характеристиками пробоя известны как стабилитроны (диоды Зенера). Возможность управления дает ряд очевидных преимуществ, поскольку позволяет использовать стабилитроны в качестве стабилизаторов напряжения внутри схемы.

## Измерение характеристик МОП-транзисторов

Кремниевые МОП-транзисторы получили доминирующее распространение в цифровой электронике по многим причинам, главной из которых является возможность относительно легко увеличивать их количество в интегральной схеме (по крайней мере до недавнего времени) по мере совершенствования литографии. Принцип работы МОП-транзистора более понятен, чем биполярного транзистора. По сути, в МОП-транзисторе существуют две сильнолегированные смежные области (исток и сток), разделенные каналом с противоположным типом примеси. Прикладывая напряжение к затвору, расположенному над каналом, можно индуцировать такой заряд в канале, при котором образуется проводящий канал между истоком и стоком.

### Принцип работы МОП-транзисторов (MOSFET)

Ниже показан упрощенный поперечный разрез МОП-транзистора с n-каналом (NMOS) при положительном смещении на затворе и замкнутом на землю источнике. **Примечание.** Здесь мы также предполагаем, что приложенное к подложке напряжение равно нулю.



**Рис. 7.7.** МОП-транзистор с n-каналом со смещением на затворе, превышающем пороговое напряжение и с пренебрежимо малым напряжением между стоком и истоком

В этом примере напряжение, приложенное к стоку ( $V_d$ ) меньше напряжения, приложенного к затвору ( $V_g$ ). Пока  $V_g$  превышает пороговое напряжение ( $V_t$ ), необходимое для инвертирования канала, между истоком и стоком существует проводящий канал. При этом ток стока ( $I_d$ ) определяется отношением заряда в канале ( $Q_{ch}$ ) ко времени, которое требуется носителям для преодоления канала ( $T_{tr}$ ).

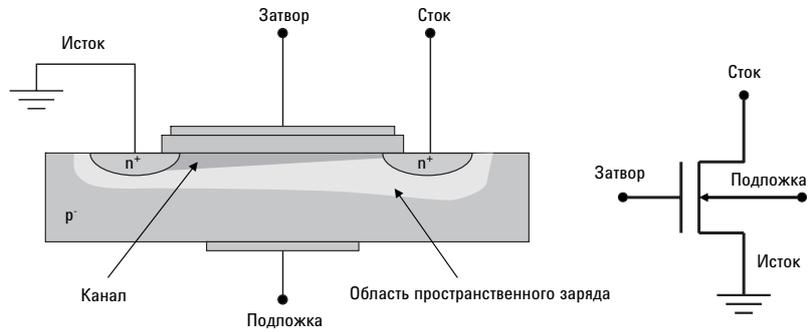
$$I_d = -\frac{Q_{ch}}{T_{tr}} \quad (\text{Уравнение 7.12})$$

Заряд канала зависит от емкости канала, площади и напряжения, приложенного к затвору. Время перехода носителей зависит от скорости их дрейфа и длины канала. В этом режиме значение тока стока аппроксимируется следующим выражением.

$$I_d = \mu_n \frac{W}{L} C_{ox} (V_g - V_t) \cdot V_d \quad (\text{Уравнение 7.13})$$

Где  $\mu_n$  – подвижность электронов  
 $W$  – ширина канала  
 $L$  – длина канала  
 $C_{ox}$  – емкость на единицу площади (затвор-канал)

Если мы увеличим напряжение стока ( $V_d$ ) до величины, которой больше нельзя пренебречь по сравнению с напряжением затвора, то область пространственного заряда и проводящий канал больше не будут равномерно распределены в пространстве (см. ниже).



$$0 < V_d < (V_g - V_t), V_g > V_t$$

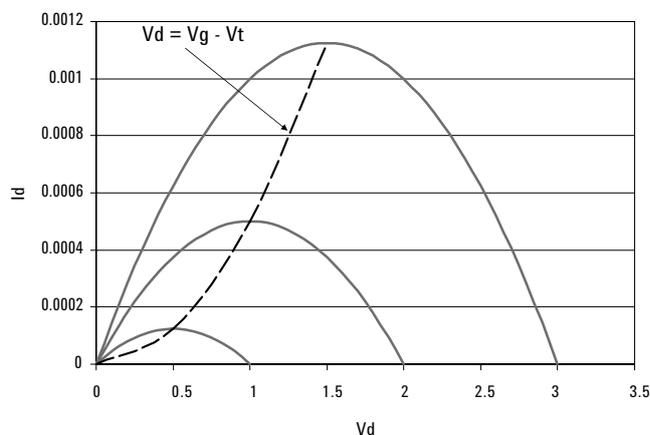
**Рис. 7.8.** МОП-транзистор с n-каналом, у которого смещение на затворе превышает пороговое напряжение, но при этом напряжением между стоком и истоком нельзя пренебречь

Простые допущения, используемые при выводе предыдущего уравнения для  $I_d$ , больше не действуют, поскольку напряжение стока уменьшает инверсионный слой вблизи стока. В сущности, это означает, что инверсионный слой меняет форму с прямоугольной на трапециевидную. Мы можем вычислить это, предполагая, что среднее напряжение в канале равно  $(V_g - V_d/2)$ . В результате получим следующее измененное уравнение для  $I_d$ .

$$I_d = \mu_n \frac{W}{L} C_{ox} \left( V_g - V_t - \frac{V_d}{2} \right) \cdot V_d \quad (\text{Уравнение 7.14})$$

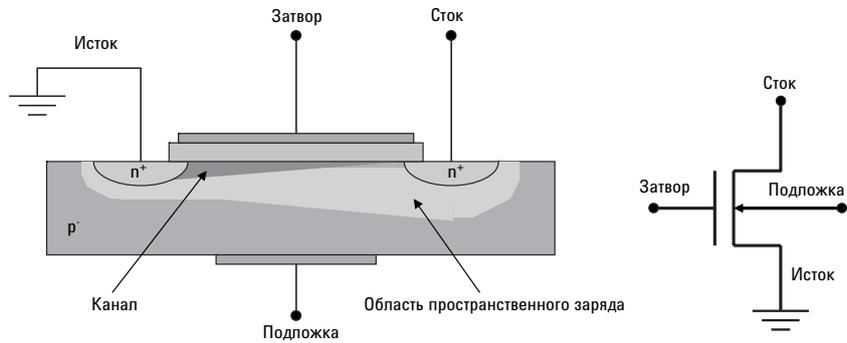
Это уравнение определяет поведение тока  $I_d$  при работе в ненасыщенной области.

Графики, построенные на основе предыдущего уравнения для различных значений  $V_g$ , представляют собой серию перевернутых парабол с максимумами в точках, где  $V_d = (V_g - V_t)$ , как показано ниже.



**Рис. 7.9.** Графики зависимости тока  $I_d$ , построенные на основе предыдущего уравнения для различных значений  $V_g$ , имеют вид перевернутых парабол

Очевидно, что значения  $V_d$ , превышающие  $(V_g - V_t)$ , не имеют никакого физического смысла, поскольку это будет означать отрицательную крутизну (крутизна равна первой частной производной  $V_d$  относительно  $V_g$ ). Чтобы понять, что происходит, рассмотрим случай, когда  $V_d$  становится больше  $(V_g - V_t)$ .



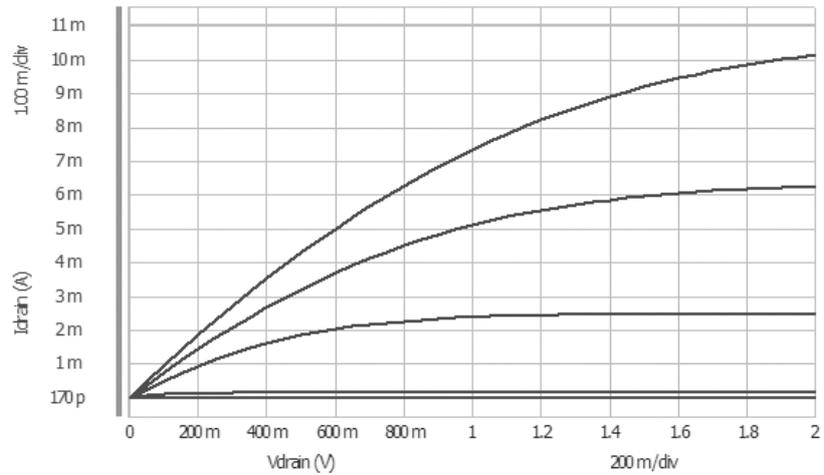
$$V_d > (V_g - V_t), V_g > V_t$$

**Рис. 7.10.** МОП-транзистор с n-каналом, у которого смещение на затворе превышает пороговое напряжение, а  $V_d$  превышает  $(V_g - V_t)$

Когда  $V_d$  становится больше  $(V_g - V_t)$ , инверсионный слой возле стока сужается. Однако для электронов, оказавшихся вблизи стока, не существует барьера, который может их остановить; они быстро ускоряются сильным электрическим полем и попадают в область стока. В этой ситуации ток определяется скоростью, с которой электроны достигают границы области истощения. В свою очередь, эта скорость зависит от максимальной скорости дрейфа электронов. Так как максимальная скорость дрейфа (по крайней мере, в первом приближении) не зависит от  $V_d$ , то напряжение  $V_d$  достигает значения  $(V_g - V_t)$ , при котором произойдет насыщение тока стока (ток становится постоянным). Значение тока стока при насыщении приведено ниже.

$$I_d = k \frac{W}{L} (V_g - V_t)^2 \quad (\text{Уравнение 7.15})$$

Зависимость  $I_d$  от  $V_d$  для МОП-транзистора с n-каналом показана ниже.



**Рис. 7.11.** Типичная зависимость тока стока  $I_d$  от напряжения стока  $V_d$  для МОП-транзистора с n-каналом

Значение константы  $k$  пропорционально произведению  $\mu_n$  и  $C_{ox}$ , но, как правило, не равно ему. В действительности, ток стока проявляет некоторую положительную зависимость от напряжения стока, так как эффективная длина канала ( $L$ ) уменьшается при больших значениях  $V_d$ . Часто величины  $k$ ,  $W$  и  $L$  объединены в одной константе, как показано ниже.

$$I_d = \beta \cdot (V_g - V_t)^2 \quad (\text{Уравнение 7.16})$$

Конечно, рассмотренная выше картина поведения МОП-транзистора крайне упрощена. Однако изменение вышеуказанных уравнений для других условий – относительно простая задача. В случае, когда вывод истока транзистора не заземлен, допустимо предположить, что (по крайней мере, в первом приближении) увеличение напряжения истока ( $V_s$ ) приводит к уменьшению влияния напряжения затвора. Поэтому целесообразно изменить уравнение для  $I_d$  в режиме насыщения для случая, когда  $V_s \approx 0$ , следующим образом:

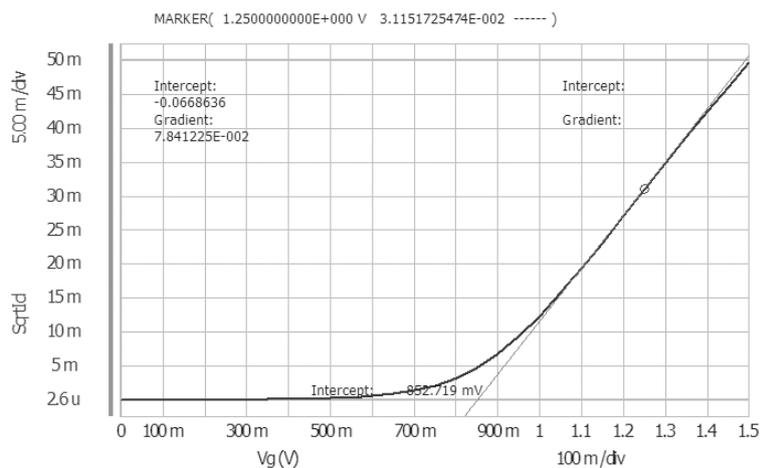
$$I_d = \beta \cdot (V_g - V_s - V_t)^2 \quad (\text{Уравнение 7.17})$$

### Основные характеристики МОП-транзисторов

Из уравнений, описывающих поведение МОП-транзистора, следует, что зависимость корня квадратного из  $I_d$  от  $V_g$  носит линейный характер.

$$\sqrt{I_d} = \sqrt{\beta} \cdot (V_g - V_s - V_t) \quad (\text{Уравнение 7.18})$$

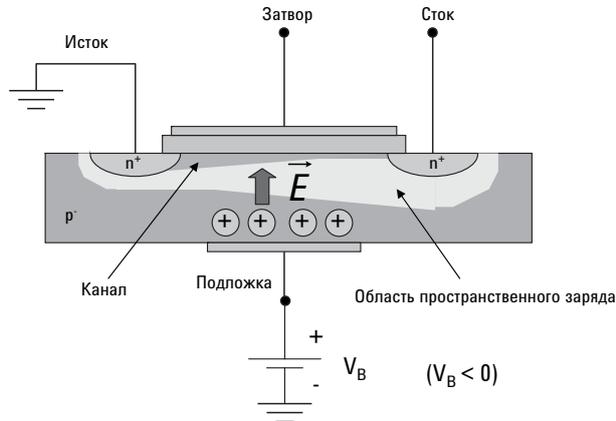
Кроме того, точка пересечения этой линии с осью X ( $V_g$ ), должна соответствовать пороговому напряжению (если исток заземлен). Таким образом, существует один простой способ для определения порогового напряжения ( $V_t$ ) МОП-транзистора: нужно построить график зависимости корня квадратного из  $I_d$  от напряжения и провести от него касательную до пересечения с осью X.



**Рис. 7.12.** Определение порогового напряжения  $V_t$  для МОП-транзисторов путем построения зависимости  $\sqrt{I_d}$  от напряжения и его экстраполяции до пересечения с осью X

**Примечание.** В действительности существует некоторый допороговый ток утечки, протекающий в транзисторе при  $V_g < V_t$ , поэтому касательная линия должна быть экстраполирована к оси X из той точки графика  $\sqrt{I_d}$ , в которой  $V_g \gg V_t$ .

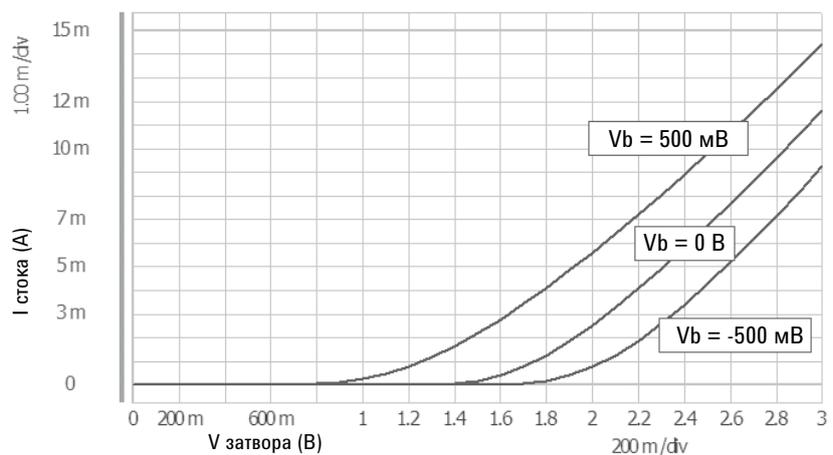
Влияние ненулевого напряжения на подложке можно понять, анализируя его воздействие на заряд в канале. Ниже рассмотрим случай, когда к подложке приложено отрицательное напряжение.



**Рис. 7.13.** Влияние отрицательного смещения, приложенного к выводу подложки МОП-транзистора с p-каналом.

Появление отрицательного заряда на подложке вызовет накопление положительного заряда вблизи вывода подложки. Воздействие этого положительного заряда будет противоположно воздействию напряжения, приложенного к затвору. Таким образом, чтобы достичь инверсии канала, на затвор потребуется подать большее напряжение, чем в случае, когда напряжение на подложке равно нулю. Таким образом, следует ожидать, что значение  $V_t$  увеличивается при увеличении отрицательного значения  $V_b$ . Это явление обычно называют «эффектом подложки» (body effect).

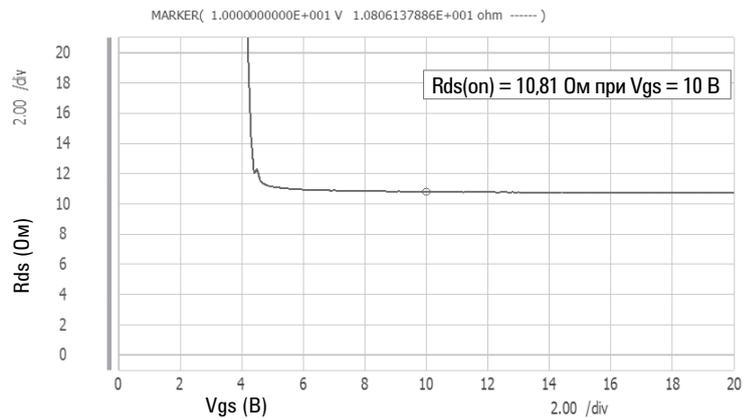
Аналогичным образом, появление положительного заряда на подложке приведет к уменьшению  $V_t$ . Рассмотрение уравнений, описывающих такое поведение, выходит за рамки нашего простого справочника, но из графика зависимости  $I_d$  от  $V_g$  для нескольких значений  $V_b$  следует, что физическая реальность соответствует этой догадке.



**Рис. 7.14.** Влияние напряжения подложки ( $V_b$ ) на пороговое напряжение ( $V_t$ )

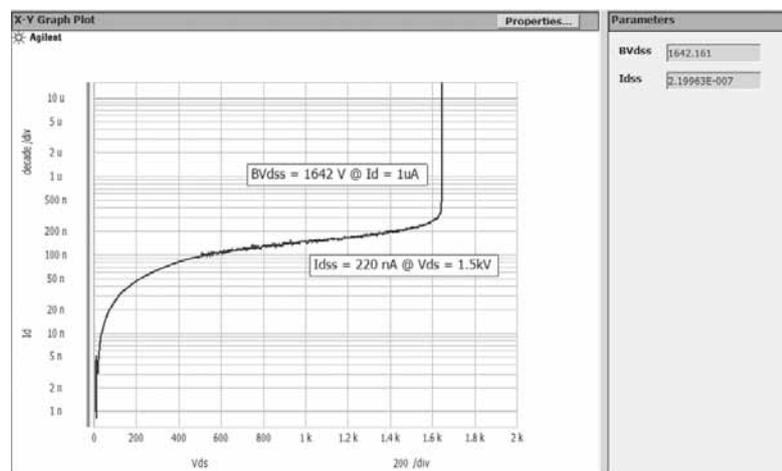
Как видно из графика, отрицательные значения  $V_b$ , сдвигающие кривую вправо, вызывают увеличение порогового напряжения ( $V_t$ ). Аналогичным образом, положительные значения  $V_b$ , сдвигающие кривую влево, вызывают уменьшение порогового напряжения.

Для мощных МОП-транзисторов важным параметром является сопротивление в открытом состоянии  $R_{ds(on)}$ . Сопротивление  $R_{ds(on)}$  представляет собой отношение напряжения сток-исток ( $V_{ds}$ ) к току стока ( $I_d$ ) в области, где МОП-транзистор находится в открытом состоянии. Анализатор B1505A позволяет легко рассчитать  $R_{ds(on)}$  при помощи своего модуля HCSMU и встроенных функций анализа ПО EasyEXPERT. В следующем примере показана зависимость сопротивления  $R_{ds}$  от напряжения затвор-исток  $V_{gs}$ . Импульсный ток стока составляет 6 А, а напряжение затвора ( $V_{gs}$ ) свипируется от 0 В до 20 В и при этом измеряется напряжение стока. На рисунке видно, что когда значение  $V_{gs}$  меньше 4 В, то мгновенное значение  $R_{ds}$  очень велико, поскольку МОП-транзистор открыт не полностью.



**Рис. 7.15.** Модуль HCSMU анализатора B1505A позволяет легко измерить сопротивление мощных МОП-транзисторов в открытом состоянии

Напряжение пробоя сток-исток ( $BV_{dss}$ ) и ток отсечки стока ( $I_{dss}$ ) также являются важными параметрами мощных МОП-транзисторов. Для определения  $BV_{dss}$  затвор и исток замыкают на землю, а напряжение стока свипируют от нуля до очень больших значений. Поскольку напряжение пробоя мощных МОП-транзисторов обычно превышает 1000 В, то использование модуля HVSMU в анализаторе B1505A – это единственная возможность выполнить такое измерение. Функции анализа ПО EasyEXPERT позволяют легко выполнить измерения и автоматического отобразить на экране значение  $BV_{dss}$  при заданном уровне тока (в данном случае – 1 мкА), чтобы точно определить момент возникновения пробоя. Аналогичным образом, задав уровень напряжения (в данном случае – 1500 В) для определения  $I_{dss}$ , можно автоматически отобразить значение этого тока. Данное измерение иллюстрируется следующим графиком.



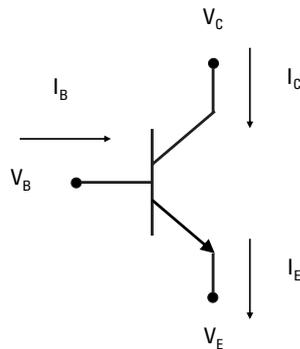
**Рис. 7.16.** Модуль HVSMU анализатора B1505A и программное обеспечение EasyEXPERT позволяют легко измерить  $BV_{dss}$  и  $I_{dss}$  мощных МОП-транзисторов

## Измерение параметров биполярных транзисторов

Поскольку в интегральных схемах преобладают КМОП технологии, то для биполярных транзисторов, в основном, остаются специализированные (хотя и не обязательно второстепенные) нишевые приложения. Сегодня биполярные транзисторы наиболее часто применяются в СВЧ схемах, силовой электронике и аналоговых цепях.

### *Принцип работы биполярного транзистора*

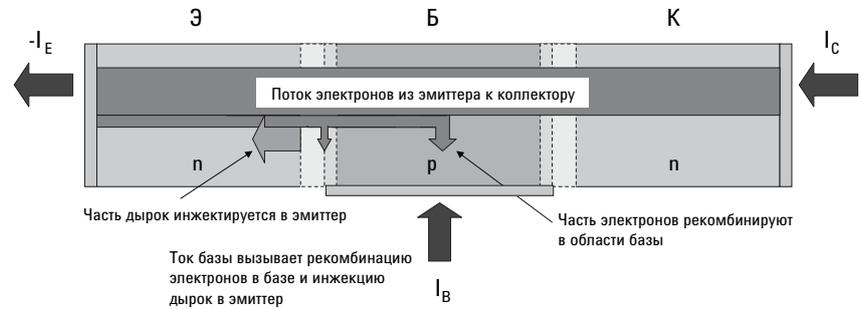
Объяснить работу биполярного транзистора немного сложнее, чем МОП-транзистора, поскольку она не является интуитивно-понятной. Биполярный транзистор состоит из трех примесных областей противоположного типа (n-p-n или p-n-p). На электрических схемах биполярный транзистор обозначается следующим образом.



**Рис. 7.17.** Условное графическое обозначение биполярного n-p-n транзистора

Обратите внимание, что переход база-эмиттер изображен такой же стрелкой, что и p-n диод. Фактически, переход база-эмиттер функционирует как p-n диод. Подобным образом, переход база-коллектор также будет выполнять функции p-n диода. Но хотя любой биполярный транзистор действительно будет работать и при прямом, и при обратном смещении, в связи с умышленным асимметричным легированием переходов, оптимальные параметры достигаются, когда переход база-эмиттер смещен в прямом направлении.

Теперь рассмотрим теперь случай, когда эмиттер n-p-n транзистора заземлен, а к базе приложено положительное напряжение. Также предположим, что напряжение на коллекторе транзистора намного больше, чем на базе ( $V_c \gg V_B$ ). Если напряжение база-эмиттер ( $V_{BE}$ ) достаточно велико, чтобы сместить переход база-эмиттер в прямом направлении, то в транзисторе будет протекать ток, как показано ниже.



**Рис. 7.18.** Принцип работ биполярного транзистора (типа n-p-n)

Конечно, поток электронов от эмиттера к коллектору эквивалентен положительному току от коллектора к эмиттеру.

Как и в случае p-n диода, существует экспоненциальная зависимость между током и напряжениями база-коллектор ( $V_{bc}$ ) и база-эмиттер ( $V_{BE}$ ). Если предположить, что напряжение  $V_{bc}$  нулевое или отрицательное, то ток коллектора можно примерно описать следующим уравнением.

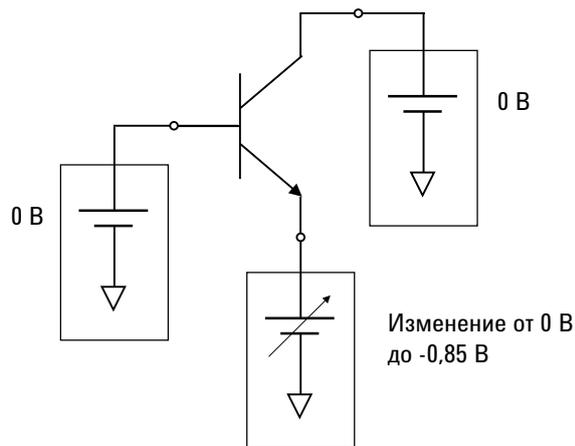
$$I_c \approx I_o \left( e^{\left( \frac{qV_{BE}}{kT} \right)} \right) \quad (\text{Уравнение 7.19})$$

Из этого уравнения следует, что небольшие изменения напряжения база-эмиттер приводят к значительным изменениям тока коллектора. Таким образом, когда на n-p-n транзистор подано напряжение  $V_{BE}$ , достаточное для того, чтобы он стал активным (открылся), величина тока коллектора ограничивается только величиной тока, протекающего в базе транзистора. Как показано на схеме выше, такой базовый ток необходим, чтобы вызвать рекомбинацию электронов в области базы, а также инжекцию дырок в эмиттер. Существует простая линейная связь между токами базы и коллектора, определяемая следующим уравнением.

$$I_c = \beta \cdot I_B \quad (\text{Уравнение 7.20})$$

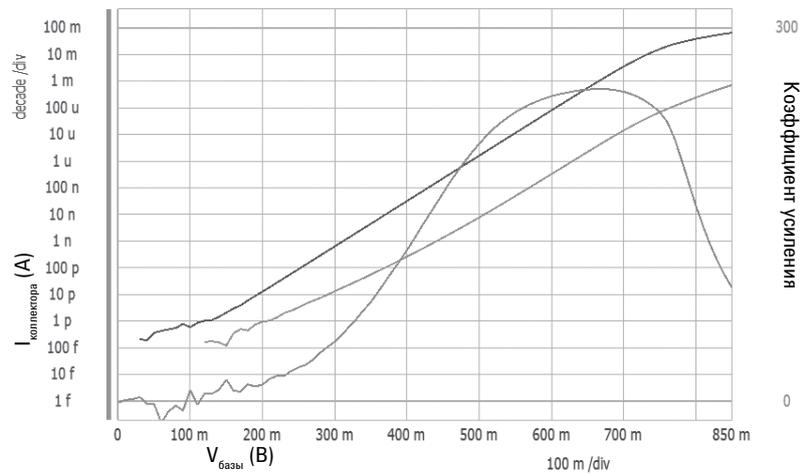
### Основные характеристики биполярного транзистора

Вероятно, наиболее важным параметром биполярного транзистора является его коэффициент усиления по току, называемый «бета». В терминах h-параметров его часто обозначают в виде параметра « $h_{FE}$ », который означает коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером при постоянном напряжении на коллекторе. Для определения коэффициента усиления по току при различных значениях коллекторного тока, как правило, используется кривая Гуммеля. Один из способов построения кривой Гуммеля для n-p-n транзистора состоит в том, чтобы установить напряжение на коллекторе и базе равным нулю и изменять отрицательное напряжение на эмиттере. Затем измеряются значения тока базы и тока коллектора и строится график в логарифмическом масштабе (так как из уравнений 7.19 и 7.20 следует, что натуральный логарифм от тока базы и тока коллектора должен представлять собой прямую линию).



**Рис. 7.19.** Типовая схема для построения кривой Гуммеля для биполярного транзистора

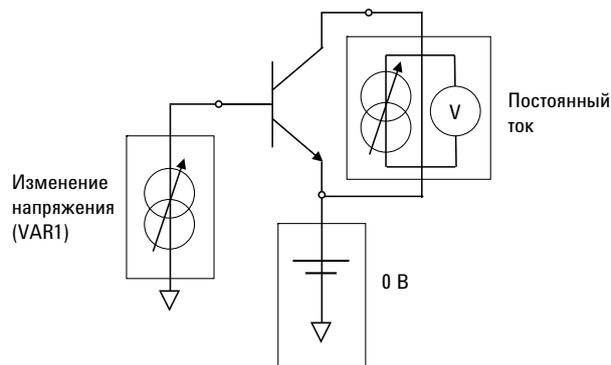
Ниже показана реальная кривая Гуммеля.



**Рис. 7.20.** Кривая Гуммеля для *n-p-n* биполярного транзистора, измеренная с помощью анализатора *B1500A*. Здесь же представлены зависимости  $I_c$ ,  $I_b$  и рассчитанное значение бета

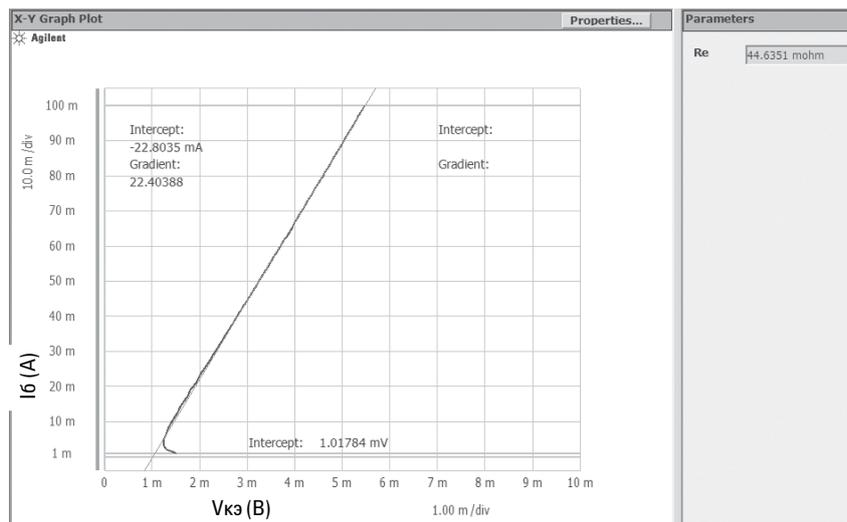
По кривой видно, что значение коэффициента усиления по току для транзистора фактически зависит от тока коллектора, пока он не достигнет достаточно большого значения, хотя оно остается примерно постоянным в достаточно широком диапазоне значений тока коллектора.

Еще одним важным параметром биполярного транзистора является сопротивление эмиттера ( $R_э$ ). Чаще всего данный параметр измеряется следующим методом. При этом SMU, подключенный к выводу коллектора, находится в режиме источника тока очень низкого уровня (почти нулевого тока), являясь, по существу, вольтметром с высоким сопротивлением. SMU, подключенный к выводу базы, также установлен в режим источника тока. При этом измеряется напряжение коллектор-эмиттер ( $V_{кэ}$ ) и строится его график в зависимости от тока базы ( $I_b$ ).



**Рис. 7.21.** Схема измерения  $R_{э}$  биполярного транзистора

График зависимости тока базы от напряжения коллектор-эмиттер, включая область отрицательного сопротивления, строится по нескольким заданным точкам с помощью функций анализа встроенного ПО EasyEXPERT. Наклон линейной части этой зависимости выражается в единицах «ампер/вольт» и представляет собой величину, обратную сопротивлению (которое выражается в «вольт/ампер»). Таким образом, величина, обратная наклону, дает нам значение сопротивления эмиттера ( $R_{э}$ ). График зависимости тока базы ( $I_B$ ) от напряжения коллектор-эмиттер ( $V_{кэ}$ ), определяющая сопротивление эмиттера, показана ниже.



**Рис. 7.22.** Определение сопротивления эмиттера методом обратного хода

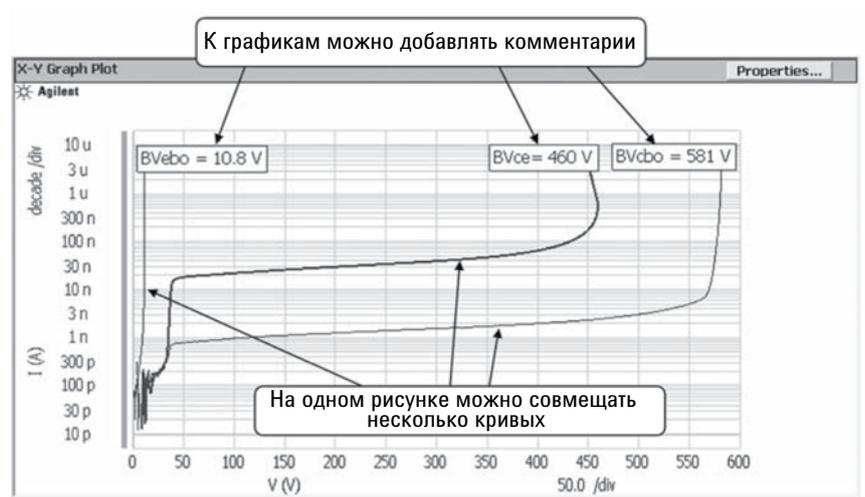
Как и в случае с мощными МОП-транзисторами, напряжение пробоя мощных биполярных транзисторов также является важным параметром. Напряжения пробоя перехода мощных плоскостных биполярных транзисторов (BJT) обозначаются следующим образом:

$V_{CBo}$  – 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

Модуль HVSMU анализатора B1505A может измерять напряжения пробоя большинства мощных биполярных транзисторов, а также ток утечки с пикоамперным разрешением. Графические функции ПО EasyEXPERT позволяют легко совместить различные результаты измерений пробоя на одном графике и добавить туда комментарии для использования в отчетах и презентациях. Пример показан ниже.



**Рис. 7.23.** Семейство кривых напряжений пробоя биполярного транзистора высокой мощности совмещены на одном графике

Если вы хотите получить более подробную информацию об измерении характеристик мощных устройств, пожалуйста, обратитесь к выпущенным компанией Agilent Technologies рекомендациям по применению B1505-1 «Точное и эффективное измерение характеристик силовых электронных приборов при 3000 В/20 А» (5990-3749EN).

## Глава 8. Основы измерения емкости

*Бурная деятельность не заменит понимания.*

Г.Г. Уильямс

### Введение

Измерение емкости является одной из задач параметрического тестирования, при решении которой часто совершаются ошибки, многие из которых легко предотвратить. Причиной этого является не недостаток интеллекта со стороны пользователя, а скорее отсутствие у него фундаментальных знаний по теории измерений емкости и связанное с этим неумение правильно их выполнять. К сожалению, этому, как правило, не учат в университетах, и знания можно получить довольно болезненным опытным путем или изучив литературу по данному вопросу, например, данную публикацию.

Почему же инженеры допускают так много ошибок при измерении емкости, особенно на полупроводниковой пластине? Основные причины приведены ниже:

1. При измерении емкости необходима компенсация влияния паразитной индуктивности и емкости измерительных кабелей и выводов, которая часто выполняется не совсем неправильно (или вообще неправильно).
2. Наведенный ток протекает через наружный экран разъемов ВНС (если они используются) к измерителю емкости и этот ток необходим, чтобы сбалансировать ток, измеряемый измерителем емкости. Если наружный экран заземлен, то наведенный ток замыкается на землю и мост может не находиться в состоянии баланса. Многие пользователи не знают об этой проблеме.
3. Измерение емкости на полупроводниковой пластине с держателем пластины сильно отличается от измерения емкости дискретного устройства. Влияние держателя зондовой станции на результаты измерения нельзя игнорировать.
4. Для более высоких частот измерения ( $> 5$  МГц) наибольшее влияние на успех или неудачу измерений оказывает тестовая структура (схема).

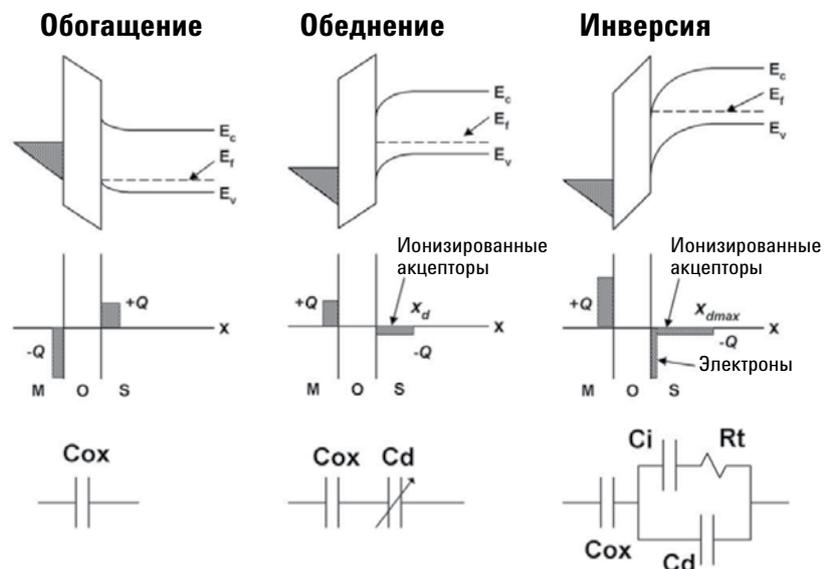
По мере продвижения по этой (довольно длинной) главе мы рассмотрим все эти вопросы более подробно.

## Измерение емкости МОП-транзисторов

### Обзор поведения емкости МОП-транзисторов

Прежде чем перейти к изучению теоретических основ измерения емкости, полезно вспомнить принципы работы МОП-устройств, что, в свою очередь, поможет понять, зачем нужно проводить эти измерения. В то время как представленные в этой главе способы измерения емкости являются общими и могут использоваться для множества устройств различных типов, преобладание МОП-структур в современной электронике заставляет посвятить их эксплуатационным характеристикам отдельный раздел этой книги.

МОП-транзисторы представляют собой «конденсаторы», емкость которых зависит от напряжения. Величина емкости между затвором и подложкой зависит от приложенного напряжения постоянного тока и может быть измерена с помощью небольшого по амплитуде переменного сигнала, модулирующего постоянное напряжение. Следующие диаграммы демонстрируют поведение n-канальных МОП-транзисторов при изменении напряжения, прикладываемого к затвору, с отрицательного на положительное.



**Рис. 8.1.** Изменение емкости n-канального МОП-транзистора в зависимости от напряжения, приложенного к затвору

Если кремниевая подложка соединена с землей, а к затвору приложено отрицательное напряжение, то МОП-конденсатор начнет накапливать положительный заряд на поверхности кремния. Концентрация дырок на поверхности становится больше, чем  $N_a$  (концентрация акцепторов); это состояние называется поверхностным накоплением заряда. В таком состоянии подвижные носители зарядов по обе стороны оксида могут быстро реагировать на изменение приложенного напряжения и устройство выглядит как конденсатор с расстоянием между параллельными пластинами  $t_{ox}$ . Поскольку это чистая емкость оксида, то обозначим ее  $C_{ox}$ .

Если к затвору относительно кремниевой подложки прикладывают положительное напряжение, то имеющееся положительное напряжение между затвором и кремниевой подложкой еще сильнее увеличится. Поверхность кремния сильнее обедняется носителями, на поверхности появляется большое количество акцепторов, что приводит к состоянию, называемому обеднением поверхностного слоя. Электростатически анализ такого состояния показывает, что суммарную емкость МОП-прибора можно представить в виде последовательно соединенных емкостей  $C_{ox}$  и  $C_d$  (емкости, сформированной перпендикулярно поверхности обедненной области). Обратите внимание, что величина  $C_d$  зависит от приложенного напряжения.

Если затем существенно увеличить положительное напряжение на затворе, то внутри объема кремния положение энергетических уровней внутри энергетических зон заметно изменится. Обедненная область достигнет максимальной ширины  $x_{dmax}$  и все акцепторы в этой области полностью ионизируются. В приповерхностной области генерация носителей превысит их рекомбинацию и генерируемые электроны будут захватываться электрическим полем на границе оксид-кремний, где они останутся благодаря энергетическому барьеру между участками проводимости кремния и оксида. Таким образом, полный заряд кремния будет состоять из суммы этих двух зарядов. Из электростатического анализа следует, что суммарная емкость МОП-прибора может быть представлена как емкость оксида, соединенная последовательно с контуром, состоящим из емкости обедненного слоя  $C_d$ , включенной параллельно с последовательно соединенными емкостью поверхностного заряда  $C_i$  и сопротивлением обедненного слоя  $R_t$  (см. рис. 8.1).

#### Пример расчетов параметров МОП-транзистора

Важность измерения емкости между затвором и подложкой МОП-транзистора заключается в том, что зная только ее значение, можно рассчитать многие важные параметры электронного прибора, например, концентрацию примеси в подложке ( $N_{sub}$ ) и напряжение плоских зон ( $V_{fb}$ ). Проиллюстрируем это примером расчета параметров по вольт-фарадной характеристике (ВФХ). Все последующие расчеты будут основаны на ВФХ, показанной ниже.

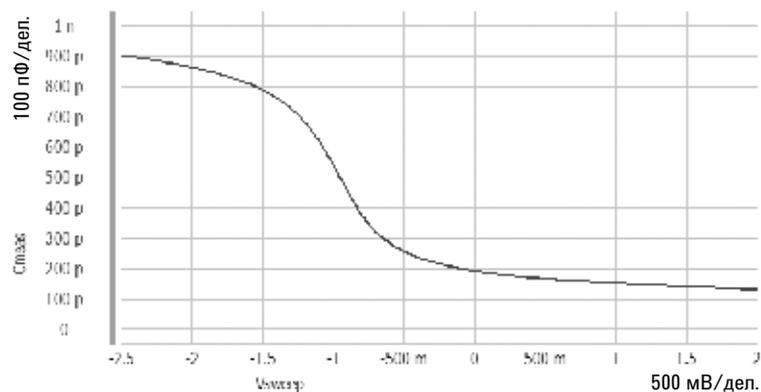


Рис. 8.2. График зависимости емкости от напряжения (ВФХ)

Толщину оксидного слоя затвора МОП-транзистора ( $t_{ox}$ ) можно вычислить из обычного уравнения для конденсатора с параллельными пластинами:

$$t_{ox} = \frac{A \cdot 10^8 \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_d}{C_{ox}} \quad [\text{Ангстрем}] \quad (\text{Уравнение 8.1})$$

Где  $A$  – площадь пластины конденсатора затвора [ $\text{см}^2$ ]  
 $\epsilon_o$  – диэлектрическая проницаемость вакуума ( $8,854 \times 10^{-14}$  Ф/см)  
 $\epsilon_d$  – диэлектрическая постоянная  $\text{SiO}_2$  (3,9)  
 $C_{ox}$  – измеренная емкость в режиме глубокого обогащения ( $V_g$  смещ. =  $V_{dd}$ ) [Ф]

При  $C_{ox} = 9,040 \times 10^{-10}$  Ф и  $A = 0,001$   $\text{см}^2$  получим:

$$t_{ox} = 37 \text{ ангстрем}$$

Следующие два параметра, которые мы должны рассчитать, это концентрация примеси в подложке и потенциал Ферми. Они рассчитываются по следующим формулам:

$$N_{sub} = \frac{4 \cdot |\phi_f|}{q \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_{Si}} \left( \frac{C_{s_{min}}}{A} \right)^2 \quad [1/\text{см}^3] \quad (\text{Уравнение 8.2})$$

$$\phi_f = \pm \frac{kT}{q} \cdot \ln \left( \frac{N_{sub}}{n_i} \right) \quad [\text{В}] \quad (\text{Уравнение 8.3})$$

Где  $N_{sub}$  – концентрация примеси в подложке  
 $n_i$  – концентрация собственных носителей [ $1/\text{см}^3$ ]  
 $\Phi_f$  – потенциал Ферми [Вольт]  
 $C_{s_{min}}$  – минимальная емкость обедненного слоя [Ф]  
 $\epsilon_{Si}$  – диэлектрическая постоянная Si (11,7)  
 $q$  – заряд электрона ( $1,602 \times 10^{-19}$  кулон)  
 $k$  – постоянная Больцмана ( $1,38 \times 10^{-23}$  Дж/к)  
 $T$  – абсолютная температура [градусы К]

**Примечание.** Знак потенциала Ферми определяется типом примеси в канале.

Знак плюс (+) – для p-легированных каналов (n-МОП-транзисторы), минус (-) – для n-легированных каналов (p-МОП-транзисторы).

Эти уравнения не имеют решения в явной форме и должны быть решены итеративно. Используя значение  $C_{s_{min}} = 2,01 \times 10^{-10}$  Ф из примера выше и проводя повторные итерации на компьютере, мы придём к следующим значениям  $N_{sub}$  и  $\Phi_f$ :

$$N_{sub} = 1,812 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$$

$$\Phi_f = 0,4315 \text{ В}$$

Где  $A = 0,001$   $\text{см}^2$  и  $T = 300$  °К

Дебаевский радиус может быть рассчитан по следующей формуле:

$$\lambda = \sqrt{\frac{2k \cdot T \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_{Si}}{q^2 \cdot N_{sub}}} \quad (\text{Уравнение 8.4})$$

Значение емкости обедненного слоя при условии наличия плоских зон  $C_{sfb}$  определяется по формуле:

$$C_{sfb} = \frac{\sqrt{2} \cdot A \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_{Si}}{\lambda} \quad (\text{Уравнение 8.5})$$

Подставив в эти два уравнения значение  $N_{sub}$ , вычисленное ранее, получим:

$$C_{sfb} = 1,0789 \times 10^{-9} \Phi$$

Т. к. емкость области плоских зон ( $C_{fb}$ ) представляет собой последовательно соединенные емкости  $C_{ox}$  и  $C_{sfb}$ , значит:

$$C_{fb} = \frac{C_{ox} \cdot C_{sfb}}{C_{ox} + C_{sfb}} \quad (\text{Уравнение 8.6})$$

Подставляя ранее вычисленные значения  $C_{ox}$  и  $C_{sfb}$  в эту формулу, получаем значение  $C_{fb}$ :

$$C_{fb} = 4,9185 \times 10^{-10} \Phi$$

Чтобы получить значение напряжения в области плоских зон ( $V_{fb}$ ), мы должны взять полученное значение  $C_{fb}$  и выполнить линейную интерполяцию на нашем графике. Две точки по обе стороны от значения  $C_{fb}$ , которые мы только что рассчитали, следующие:

$$V = -0,9 \text{ В}, C = 454 \text{ нФ}$$

$$V = -1,0 \text{ В}, C = 540 \text{ нФ}$$

Таким образом, мы получаем значение напряжения в области плоских зон:

$$V_{fb} = 0,9440 \text{ В}$$

Следующим полезным параметром для расчета является поверхностная плотность заряда ( $Q_{ss}$ ). Как правило, эта величина делится на заряд электрона ( $q$ ) и выражается в виде  $Q_{ss}/q$ :

$$\frac{Q_{ss}}{q} = \frac{C_{ox}}{q \cdot A} \cdot |\Phi_{ms} - V_{fb}| \quad [1/\text{см}^3] \quad (\text{Уравнение 8.7})$$

В этом примере

$$\Phi_f = 0,4315 \text{ В}$$

$$\Phi_{ms} = -0,6 - \Phi_f = -1,032 \text{ В}$$

где  $\Phi_{ms}$  – разница рабочих функций выхода для материала полупроводника (Si) и затвора (поликристаллического Si). Таким образом, подставляя числа, мы получаем, что:

$$Q_{ss}/q = 4,9375 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$$

Мы можем вычислить фиксированный заряд в обедненном слое ( $Q_b$ ) и величину  $V_{th}$  (напряжение открывания) с помощью следующих уравнений

$$Q_b = \pm q \cdot N_{sub} \cdot \frac{A \cdot \epsilon_o \cdot \epsilon_{Si}}{C_{s_{min}}} \quad [\text{Кулон/см}^2] \quad (\text{Уравнение 8.8})$$

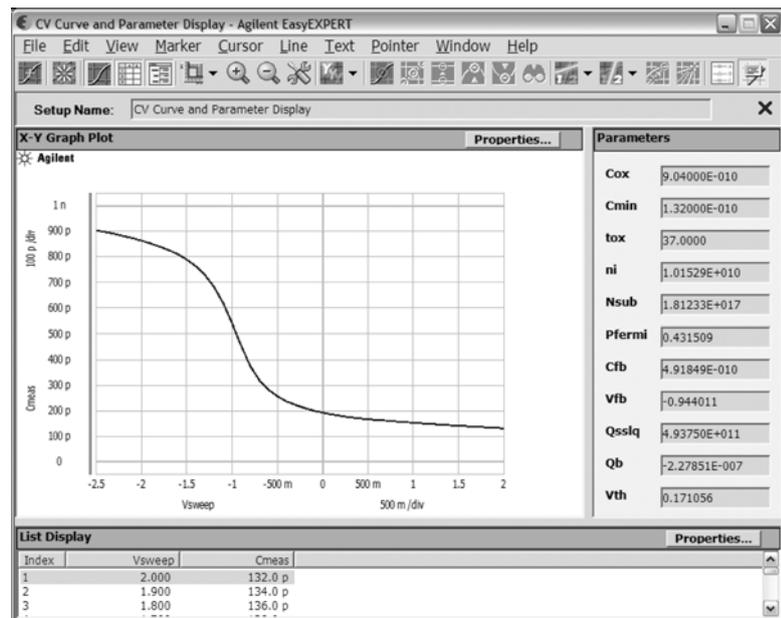
$$V_{th} = V_{fb} + \left( 2 \cdot \phi_f - \frac{A \cdot Q_b}{C_{ox}} \right) \quad [\text{Вольт}] \quad (\text{Уравнение 8.9})$$

**Примечание.** Знак  $Q_b$  определяется видом примеси в канале. Это плюс (+) для n-легированных каналов (p-МОП-транзисторы) и минус (-) для p-легированных каналов (n-МОП-транзисторы). Подставляя значения, вычисленные ранее, получим

$$Q_b = -2,2785 \times 10^{-7} \text{ Кулон/см}^2$$

$$V_{th} = 0,1711 \text{ В}$$

Очевидно, что для автоматизации извлечения этого параметра лучше использовать специальный тест.



**Рис. 8.3.** Автоматическое вычисление параметров «конденсатора» МОП-транзистора с помощью ПО Agilent EasyEXPERT

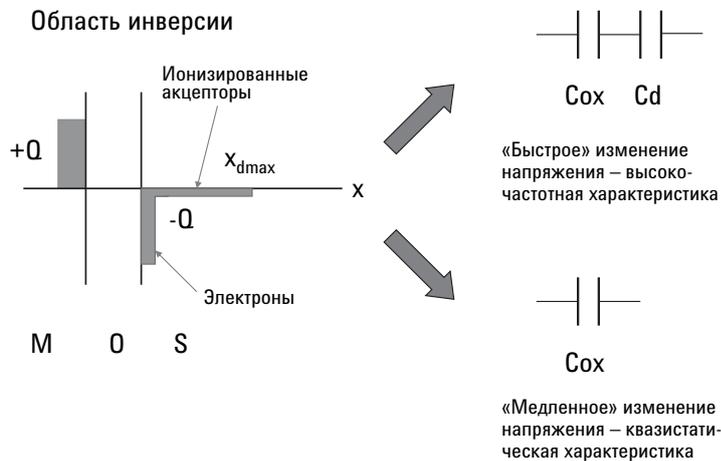
**Примечание.** Тест для выполнения этого расчета можно загрузить со страницы изделия В1500А на веб-сайте компании Agilent Technologies.

## Квазистатическое измерение емкости

Важно понимать, что способ измерений «воздействие/отклик», применяемый для получения квазистатической ВФХ (далее обозначаемой QSCV) МОП-транзистора, не является измерительной методикой. И хотя одни методики измерения лучше подходят для получения QSCV МОП-транзистора, чем другие, правильность ее измерения зависит от самого процесса, прибора, схемы измерения, а также от типа воздействия, прикладываемого к МОП-транзистору. Поэтому, поскольку в следующем разделе мы обсудим методику измерения QSCV с помощью ступенчатого напряжения, то стоит иметь в виду, что в некоторых случаях QSCV прибора может быть также оценена с использованием более традиционных способов измерения емкости с помощью генератора. Кроме того, простое использование методики измерения QSCV с помощью ступенчатого напряжения не гарантирует получения истинной QSCV прибора.

### Получение зависимости QSCV

Прежде чем приступить к объяснению методики измерения QSCV с помощью ступенчатого напряжения, было бы полезно проанализировать разницу между QSCV и HFCV (высокочастотной ВФХ).



**Рис. 8.4.** Квазистатическая и высокочастотная ВФХ (QSCV и HFCV) *n*-МОП-транзисторов при воздействии различных напряжений

Когда полупроводниковый канал полностью инвертирован (как показано выше), то возникают и рекомбинируют только источники свободных электронов. Если прикладываемое напряжение изменяется достаточно медленно, то в результате этих процессов могут возникать подвижные электроны, а конденсатор будет представлять собой обычный конденсатор с параллельными пластинами, емкость которого примерно равна  $C_{ox}$ . В результате мы получаем классическую зависимость QSCV. Однако если напряжение меняется быстрее, чем может происходить генерация и рекомбинация, то область ионизированного акцептора должна изменяться для поддержания баланса заряда. В этом случае суммарная емкость должна представлять собой сумму последовательно соединенных емкости оксида и емкости обедненной области ( $C_{ox} + C_d$ ). Полное значение емкости снижается до величины меньшей, чем  $C_{ox}$ , что и приводит в результате к получению характеристики, известной как HFCV.

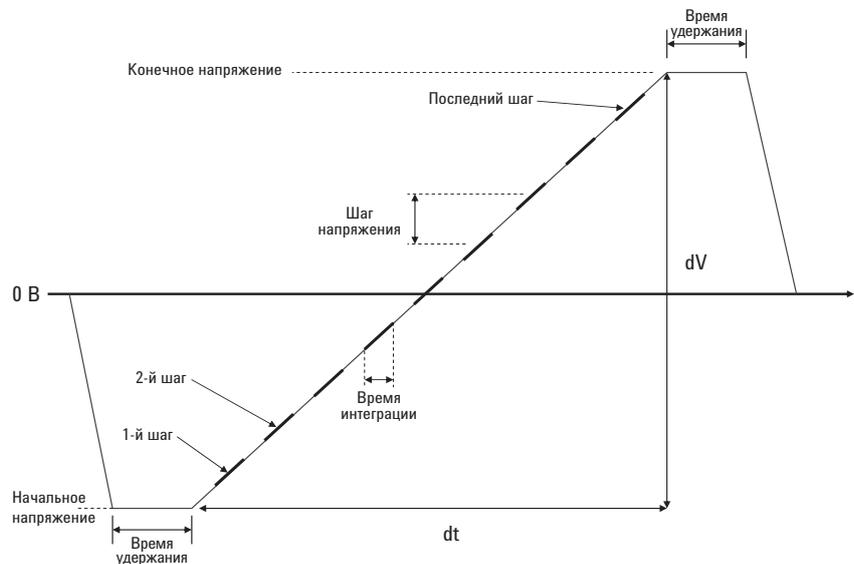
В то время как во многих учебниках пытались вывести уравнения с целью определения того, какое изменение напряжения является достаточно «медленным» для получения характеристики QSCV, опыт измерений показывает, что снятие QSCV для МОП-транзисторов – это наполовину искусство и наполовину наука. На практике обычно лучше начать свипирование в области инверсии, а затем приступить к свипированию в областях обеднения и накопления. Кроме того, может потребоваться до начала свипирования подать на конденсатор на несколько секунд напряжение смещения постоянного тока, пока происходит инвертирование. Иногда также полезно осветить устройство для стимулирования генерации неосновных носителей до начала свипирования. Однако в этом случае следует выключить свет непосредственно перед свипированием, поскольку он нарушает тепловое равновесие конденсатора и искажает результаты измерений.

*Метод измерений QSCV с помощью линейно нарастающего напряжения*

Классический метод измерения QSCV предусматривает использование линейно нарастающего напряжения, получаемого с помощью таких приборов, как Agilent 4140B. 4140B может генерировать линейно нарастающее напряжение с постоянным наклоном, позволяющее вычислить емкость через основное соотношение между током, напряжением и емкостью.

$$i = C \frac{dV}{dt} \Rightarrow C = \frac{i}{dV/dt} \quad (\text{Уравнение 8.10})$$

Ниже показано типичное измерение QSCV с помощью этого метода.

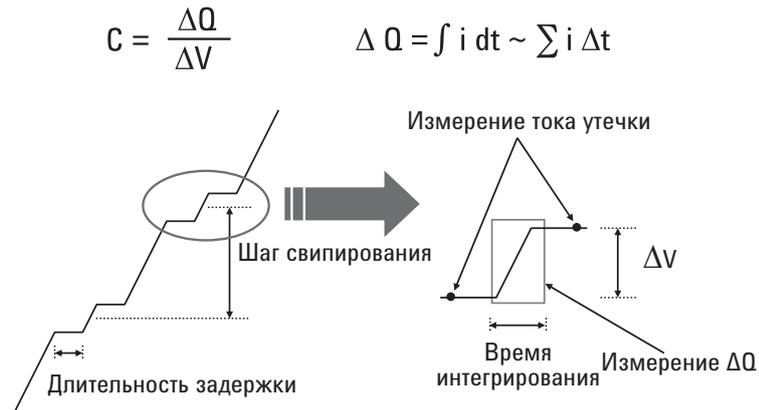


**Рис. 8.5.** Классический метод измерения QSCV с помощью линейно нарастающего напряжения, генерируемого прибором Agilent 4140B

Поскольку прибор 4140B уже снят с производства, больше не продается и не поддерживается, то этот метод был заменен на метод измерения QSCV с помощью ступенчатого напряжения.

*Метод измерения QSCV с помощью ступенчатого напряжения.*

При измерении QSCV с помощью ступенчатого напряжения линейно изменяющееся напряжение или генератор не используются. Вместо этого применяются модули «источник/измеритель» (SMU) и выполняются измерения, очень похожие на стандартное свипирование при снятии ВАХ. Основным отличием является то, что в каждой точке свипирования прикладывается задаваемый пользователем скачок напряжения  $\Delta V$ . Соответствующее изменение заряда  $\Delta Q$  может быть рассчитано путем измерения тока, индуцированного за счет  $\Delta V$ , и численного интегрирования области под кривой зависимости тока от времени. В результате можно вычислить емкость в каждой точке свипирования путем деления  $\Delta Q$  на  $\Delta V$ . Этот способ иллюстрируется рисунком:



**Рис.8.6.** Метод измерения QSCV с помощью ступенчатого напряжения

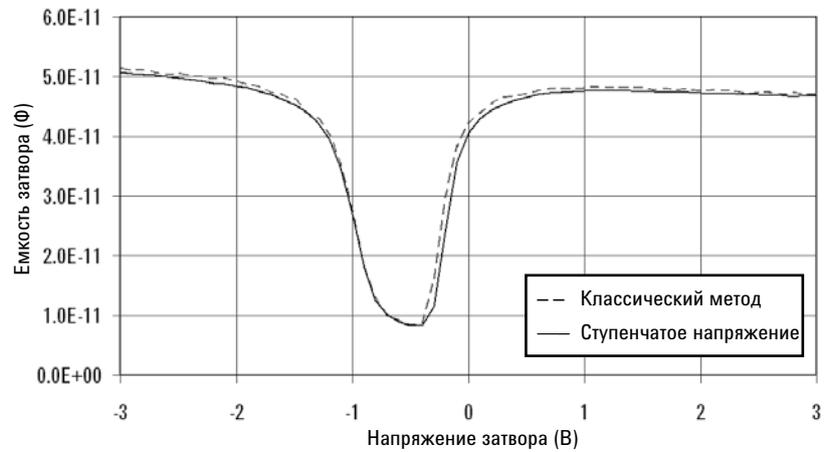
Очевидно, что величину  $\Delta V$  следует выбирать меньшей или равной шагу свипирования.

Кроме того, для измерения емкости в каждой точке свипирования алгоритм шаговой перестройки напряжения QSCV позволяет исключить токи утечки, вызванные прохождением электронов через диэлектрик затвора за счет туннельного эффекта. Это делается путем измерения тока утечки до и после прикладывания  $\Delta V$ , а затем ток утечки вычитается перед вычислением емкости. К сожалению, этот метод существенно ограничен диапазоном измерения тока, в котором выполняется свипирование емкости. Если ток утечки превышает этот диапазон измерения, то возникает ошибка. Для диэлектриков затвора с экстремальными значениями утечки (с толщиной оксида до 25 Ангстрем) метод измерения QSCV с помощью ступенчатого напряжения использовать нельзя. В этом случае единственным решением является выполнение измерений на очень высокой частоте с помощью обычной методики измерения емкости. Эта методика будет обсуждаться в данной главе позднее.

Возникает вопрос: насколько методы измерения QSCV с использованием линейно изменяющегося напряжения и ступенчатого напряжения взаимно коррелируются? Ответ: достаточно хорошо, если вы правильно выбираете параметры измерения.

- Можно использовать те же значения параметров свипирования – начало, останов и шаг
- Шаг напряжения можно определить, умножив скорость нарастания напряжения прибора 4140B на время интегрирования 4140B
- Время интегрирования следует задать равным времени интегрирования прибора 4140B
- Функцию компенсации утечки следует отключить

На следующем графике представлены результаты измерений, полученные для одного устройства с помощью двух методов измерения QSCV.



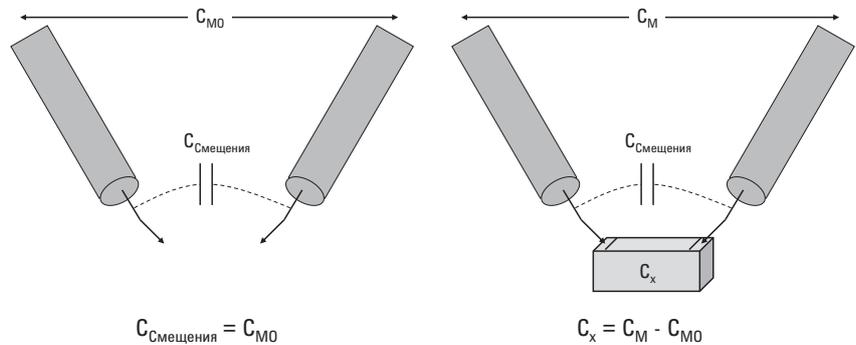
**Рис. 8.7.** Сравнение методов измерения QSCV: с помощью ступенчатого напряжения и классического, с помощью линейно изменяющегося напряжения

На рисунке видна хорошая корреляция результатов, полученных двумя методами. Если же результаты существенно отличаются, то причина заключается в том, что был неправильно выбран один или несколько параметров измерения.

- Скорость нарастания напряжения ( $dV/dt$ ), генерируемого прибором 4140В, слишком велика
- Задержка или время интегрирования слишком коротки
- Включена функция компенсации тока утечки

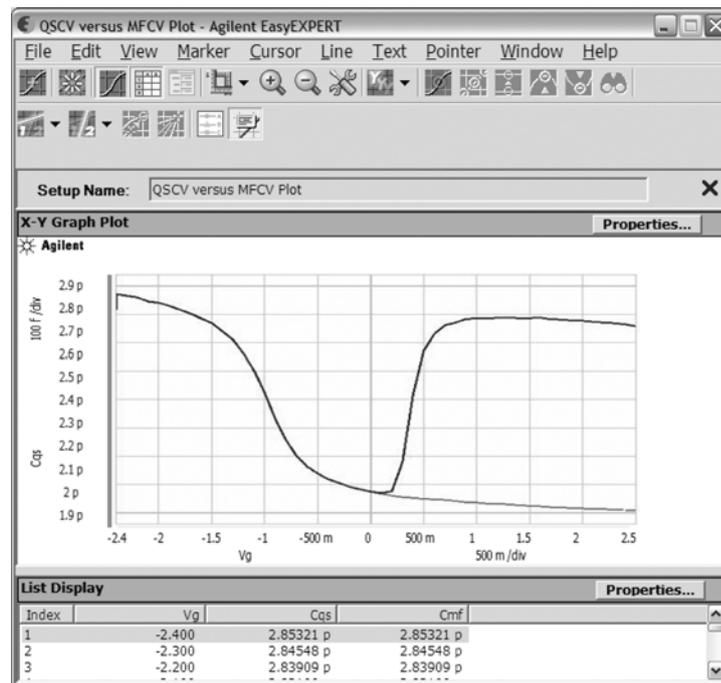
### Компенсация смещения при измерениях QSCV

Основное паразитное влияние при измерении QSCV с помощью ступенчатого напряжения оказывает емкость смещения между триаксиальными кабелями. Поэтому для этого метода измерения QSCV достаточно поддерживать обычную компенсацию смещения. Чтобы определить емкость смещения, измерительный прибор сначала измеряет емкость между наконечниками зонда, не подсоединенными к транзистору. Это значение запоминается и автоматически вычитается из последующих измерений QSCV.



**Рис. 8.8.** Методика измерения QSCV позволяет автоматически вычитать емкость смещения, присущую триаксиальным кабелям.

Такая компенсация хорошо работает при измерении QSCV и дает отличную корреляцию с результатами измерения емкости с помощью генератора.



**Рис. 8.9.** Наложение графиков квазистатической и высокочастотной ВФХ показывает, что эти две методики измерений дают очень близкие результаты

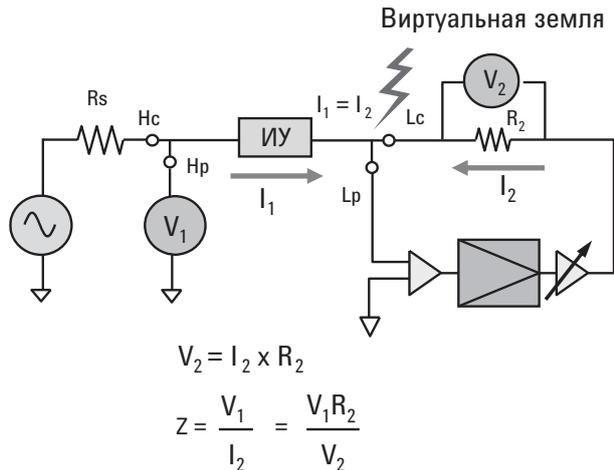
## Низкочастотное (< 5 МГц) измерение емкости

В рамках нашего обсуждения мы будем считать низкочастотными измерения, которые проводятся на частотах от нескольких Гц до 5 МГц.

### Принцип работы измерителя емкости

Для многих работа измерителя емкости остается тайной за семью печатями.

Но основной принцип работы мостовой схемы с автоматической балансировкой несложен для понимания. Рассмотрим схему, показанную ниже.



**Рис. 8.10.** Метод измерения емкости с помощью моста с автоматической балансировкой.

Мостовая схема с автоматической балансировкой работает аналогично схеме операционного усилителя (ОУ). Здесь используется закон Ома:  $V = I \times R$ . Устройство возбуждается сигналом переменного тока, при этом через вывод Н (высокий потенциал) на исследуемое устройство подается напряжение. Напряжение на выводе L (низкий потенциал) снижается до 0 вольт за счет виртуального заземления ОУ. Ток  $I_2$ , протекающий через соответствующий резистор, равен току, протекающему через испытуемое устройство (ИУ). Таким образом, выходное напряжение пропорционально току через ИУ. Напряжения и ток автоматически балансируются, что и определило название схемы. Чтобы охватить широкий диапазон частот, вместо усилителя в практических схемах используются детектор нулевого уровня и модулятор. Ниже перечислены четыре точки подключения к измерителю емкости:

Нс: Источник сигнала

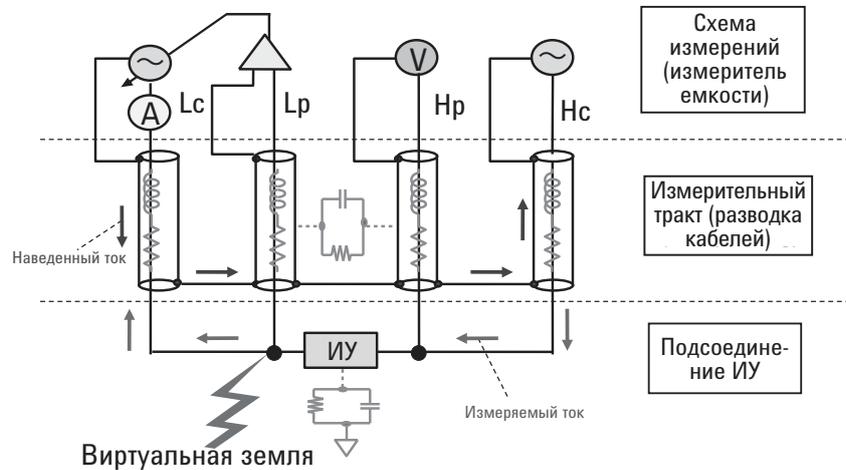
Нр: Измеритель потенциала

Лс: Измеритель тока

Лр: Измеритель потенциала, синхронизированный по фазе с измеряемым сигналом

### Метод измерений 4ТР

Наиболее распространенной методикой измерений, использующей измеритель емкости на основе мостовой схемы с автоматической балансировкой, является применение схемы с 4 парами выводов (4ТР). В ней попарно замкнуты выводы Нс и Нр, Lc и Lp, как показано ниже.



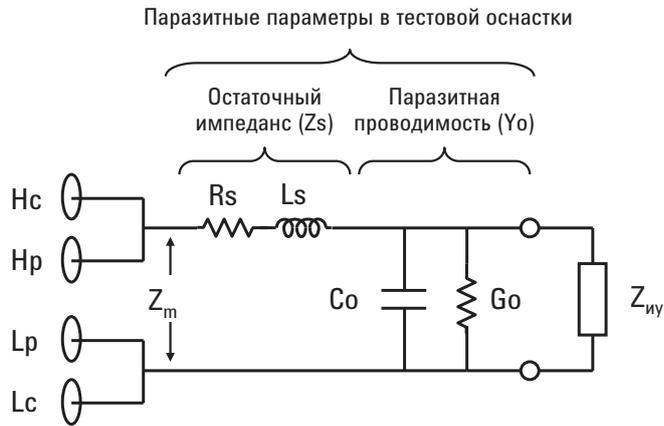
**Рис. 8.11.** Метод измерения с 4 парами выводов (4ТР) (с учетом паразитных элементов).

Выводы Нр и Нс обычно называют СМН (высокопотенциальные выводы измерителя емкости), а выводы Lp и Lc – СМЛ (низкопотенциальные выводы измерителя емкости). В измерительной схеме (в кабелях) существуют остаточная индуктивность и сопротивление, а также паразитные емкости между кабелями и между ИУ и землей (которые тоже показаны на рисунке). При использовании этого метода необходимо выполнить компенсацию измерительной схемы (кабелей), чтобы устранить влияние этих паразитных элементов; в противном случае точность измерения существенно снизится.

Выводы СМЛ схемы 4ТР являются виртуальной землей и поэтому очень важно НЕ подключать их к настоящему заземлению. Если выводы СМЛ подсоединены к заземлению, то автоматическая балансировка мостовой схемы становится невозможной и возникают ошибки измерения. Внешний проводник (экран) кабелей измерителя емкости имеет одинаковый потенциал с виртуальной землей, и его также нельзя подключать к настоящей земле. Кроме того, четыре внешних экрана должны быть соединены вместе непосредственно перед наконечником зонда с короткими кабелями. Это создает обратный путь наведенному в экране току, который стабилизирует последовательную индуктивность кабелей. Если внешние экраны не были перемкнуты и последовательная индуктивность не была стабилизирована, то любое перемещение кабеля вызовет значительные изменения его индуктивности, что сразу сделает несостоятельными все выполненные процедуры компенсации влияния кабеля.

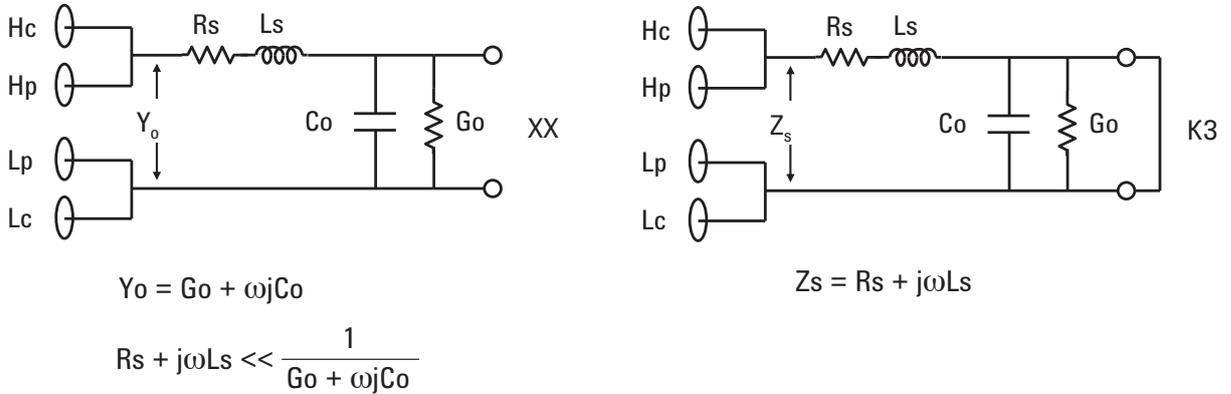
**Важность правильной компенсации**

Для измерителей емкости «калибровочная плоскость» определяет точку (как правило, это выходные разъемы BNC измерителя емкости), в которой можно получить заданную точность измерения емкости. Конечно, при параметрическом тестировании ИУ мы должны использовать кабели. При использовании метода измерения 4TP возникают разнообразные источники ошибок за счет остаточных паразитных параметров тестовой оснастки (в кабелях).



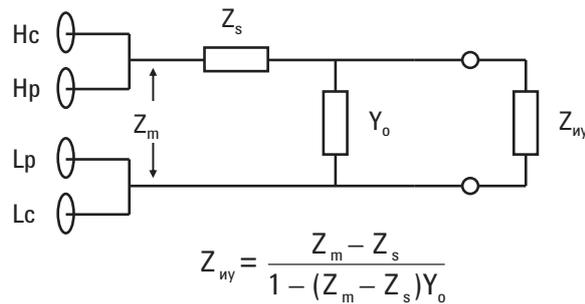
**Рис. 8.12.** Паразитные параметры тестовой оснастки (кабеле), которые необходимо учитывать, чтобы выполнить точные измерения емкости

Чтобы устранить влияние всех паразитных параметров тестовой оснастки, выполняется два измерения: одно с разомкнутыми выводами для подключения ИУ и одно с замкнутыми выводами, как показано ниже.



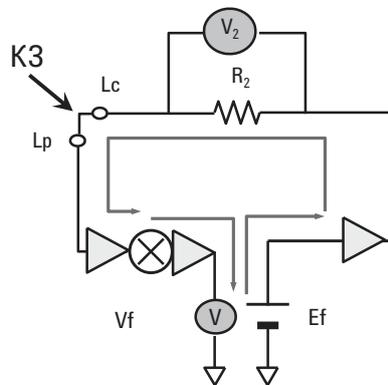
**Рис. 8.13.** Использование компенсации с помощью калибровочных мер XX/КЗ для устранения влияния паразитных параметров тестовой оснастки (XX – холостой ход, КЗ – короткое замыкание)

С помощью этих двух значений, мы можем вычислить истинное значение  $Z_{иу}$  из измеренного значения ( $Z_m$ ) с помощью уравнения, приведенного ниже.



**Рис. 8.14.** Истинное значение  $Z_{иу}$  можно вычислить, используя значения калибровочных мер ХХ и КЗ

Помимо описанной выше компенсации с помощью калибровочных мер ХХ/КЗ для устранения влияния паразитных параметров кабеля, перед первым измерением должна всегда выполняться фазовая компенсация (если эта функция поддерживается). Фазовая компенсация повышает стабильность балансировки моста на высоких частотах и минимизирует влияние смещения фазы, вызванного изменениями частоты сигнала и длины кабеля. Фазовая компенсация должна быть выполнена до компенсации паразитных параметров кабеля с помощью калибровочных мер ХХ/КЗ, и как правило, ее не нужно повторять, пока вы не измените конфигурацию схемы измерений. Во время фазовой компенсации выводы  $L_c$  и  $L_p$  должны быть замкнуты между собой. Процедура выполнения фазовой компенсации зависит от измерительного прибора, поэтому следует обратиться к его Руководству по эксплуатации, где она должна быть описана (если эта функция поддерживается).

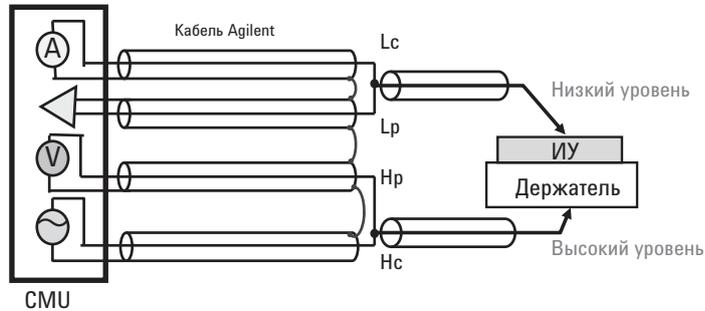


**Рис. 8.15.** Фазовая компенсация позволяет рассчитать характеристику схемы с нулевой петлей, что повышает воспроизводимость и точность фазы

Для измерений на частотах не выше 5 МГц компенсация влияния нагрузки не всегда обязательна; ее влияние на точность измерений на этих частотах зависит от характеристик используемой оснастки. Однако при измерениях на частотах выше 5 МГц всегда следует выполнять компенсацию с помощью калибровочных мер ХХ/КЗ/Согласованная нагрузка, в противном случае возникнут значительные ошибки измерения. Этот факт в случае проведения измерений на пластине требует наличия некоторых видов калиброванных резисторов и обычно выполняется с помощью ВЧ зондовых станций. Мы вернемся к этой теме, когда будем обсуждать высокочастотное измерение емкости.

### Измерение емкости на пластине

Есть ряд важных вопросов, которые необходимо принимать во внимание при измерении емкости на пластине. Наиболее важный заключается в том, каким образом следует подсоединить выводы Hc, Hp, Lc, Lp к пластине. Многие знают из опыта, что результаты измерений получаются гораздо лучше, если при использовании метода 4TP подсоединять выводы Lc и Lp к пластине (ИУ), а выводы Hc и Hp к держателю пластин.

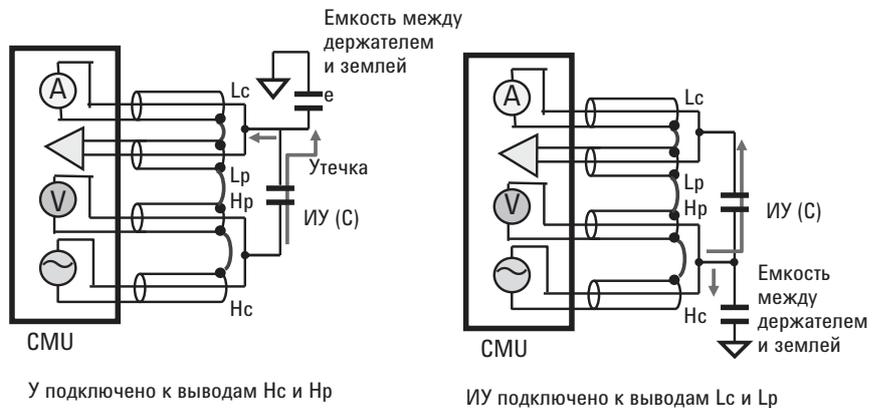


**Рис. 8.16.** Предпочтительный вариант измерения емкости на пластине с помощью метода 4TP

Однако многим непонятно, почему с помощью этой техники обеспечиваются лучшие результаты измерений. Причина становится ясной, если вспомнить, что при использовании зондовой станции необходимо учитывать емкость между держателем и землей. Во время проведения измерений на различных частотах, через емкость держателя происходит утечка на землю. Рассмотрим два случая, показанных ниже.

Ошибка – часть тока ответвляется на держатель пластины и не измеряется SMU

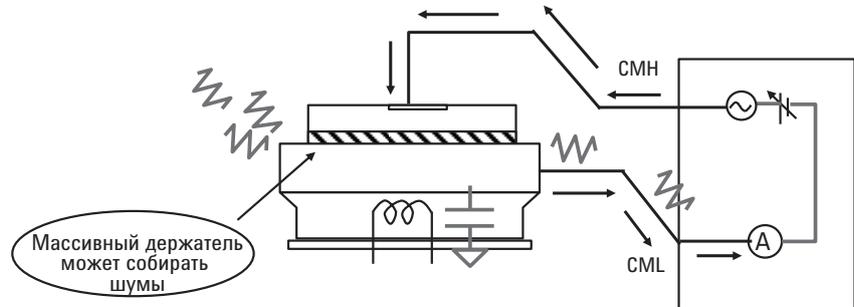
Ошибки нет – весь ток, протекающий через ИУ, измеряется SMU



**Рис. 8.17.** Объяснение причины, по которой измерение на выводах Lc и Lp устраняет ошибку измерения.

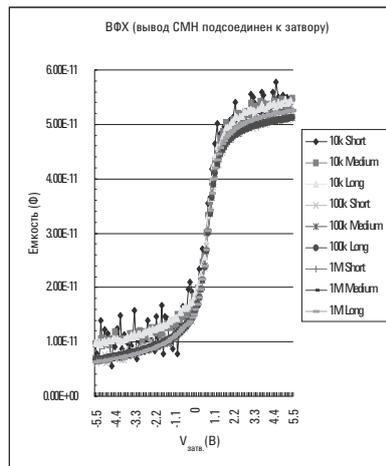
Фактическое измерение емкости происходит на выводах Lc и Lp, поэтому если к этим выводам непосредственно подсоединить ИУ, то весь ток, протекающий через ИУ, измеряется с помощью измерителя емкости, а ток, протекающий на землю через держатель пластины, не имеет значения. Конечно, при таком измерении можно сменить направление постоянного тока смещения, и это достаточно простая процедура, которая может быть легко автоматизирована.

Еще одной причиной подключения выводов Нр и Нс к держателю пластин является уровень шумов. Держатель пластин действует как большая антенна, собирая случайный электромагнитный шум. Если к держателю пластин подключены выводы Lp и Lc, то этот шум будет проходить непосредственно в измеритель емкости. В крайних случаях измеритель емкости может выдать сообщение об ошибке и вернуться в состояние несбалансированной ошибки (UNBAL). Однако если выводы Нр и Нс подключены к держателю пластин, тогда шум от держателя пластин ослабляется, проходя через ИУ.

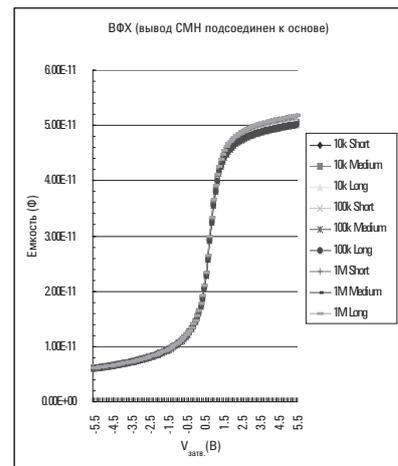


**Рис. 8.18.** Если выводы Нр и Нс подключены к ИУ, то шум от держателя пластин может попадать непосредственно в амперметр.

Следующие графики приведены с целью сравнения результатов измерений, полученных для различных частот и времени интегрирования при подключении выводов СМН к затвору или к подложке.



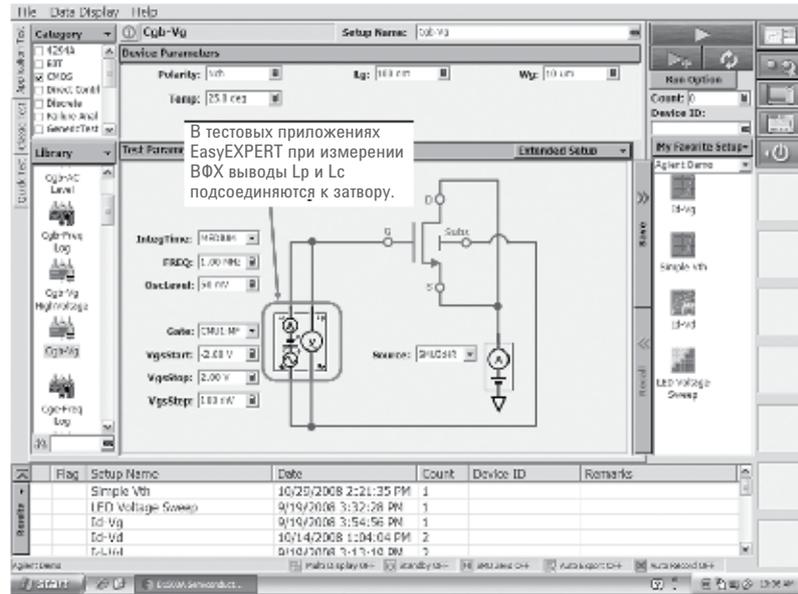
Вывод СМН подсоединен к затвору



Вывод СМН подсоединен к основе (держателю пластины)

**Рис. 8.19.** Сравнение результатов измерений, полученных при подсоединении выводов СМН к затвору или к держателю пластины (к основе)

В программном обеспечении EasyEXPERT для B1500A почти во всех тестах при измерении емкости испытуемое устройство подсоединяется к выводам CML, а держатель пластины – к выводам SMH. Приятная особенность этих тестов заключается в том, что полярности параметров на измерительных выходах инвертируются автоматически.



**Рис. 8.20.** Схема подсоединения выводов в тестовом приложении EasyEXPERT для анализатора B1500A

## Высокочастотные (> 5 МГц) измерения емкости

Выбор частоты 5 МГц в качестве точки раздела между «низкочастотными» и «высокочастотными» измерениями не является произвольным. На самом деле, это естественная граница между двумя режимами измерения. Чтобы получить удовлетворительные результаты измерений на частотах выше 5 МГц, следует использовать новые измерительные методики и схемы. Например, на частотах более 5 МГц становится все труднее или даже невозможно получить хорошие результаты измерений с помощью стандартных зондов постоянного тока. Обязательным условием становится применение ВЧ зондов с контактными площадками «земля-сигнал» (GS) или «земля-сигнал-земля» (GSG). В дополнение к этому, решающее значение приобретает реальная компоновка устройства. В самом деле, наиболее распространенной причиной, не позволяющей достичь удовлетворительных результатов измерения емкости на частотах выше 5 МГц, является не измерительное оборудование или кабели, а неправильная конструкция тестовой структуры. Поэтому важно, чтобы вы прочли и поняли этот раздел прежде, чем приступите к разработке тестовой структуры для измерения емкости.

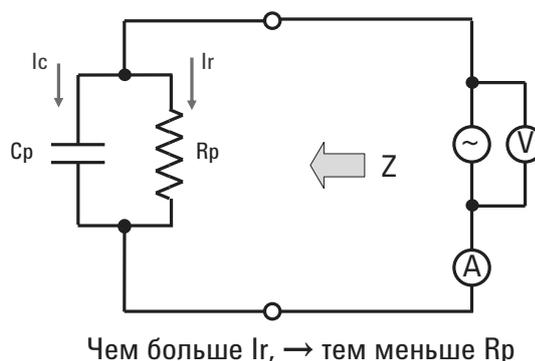
### *Проблемы, связанные с тонким слоем подзатворного диэлектрика*

Много лет назад, когда технологии позволили создавать транзисторы с чрезвычайно тонким подзатворным слоем диэлектрика (толщиной 25 Ангстрем и менее), проблема возникновения токов утечки через затвор из-за эффекта туннелирования электронов стала одной из основных в параметрическом тестировании. И хотя при стандартных измерениях ВАХ справиться с ней достаточно просто, но в процессе измерения ВФХ возникают сложности. Для успешного измерения емкости МОП-транзисторов с тонким слоем подзатворного диэлектрика (и наличием токов утечки) необходимо выполнить три основных требования.

1. Обеспечить высокую частоту измерений (> 5 МГц)
2. Создать модель устройства, подходящую для тонкого подзатворного диэлектрика
3. Исключить влияние держателя

В реальности выполнить все три требования одновременно не так легко. Измерение емкости тонкого слоя подзатворного диэлектрика – одна из наиболее сложных процедур. Рассмотрим каждое из этих требований поочередно.

Для начала возьмем двухэлементную модель емкости, изображенную ниже.



**Рис. 8.21.** Двухэлементная модель емкости

Эквивалентный импеданс этой схемы определяется выражением:

$$Z = \frac{\left( \frac{1}{C_p j\omega} \cdot R_p \right)}{\frac{1}{C_p j\omega} + R_p} = \frac{R_p}{1 + R_p C_p j\omega} = \frac{R_p - R_p^2 C_p^2 j\omega}{1 + R_p^2 C_p^2 \omega^2} \quad (\text{Уравнение 8.11})$$

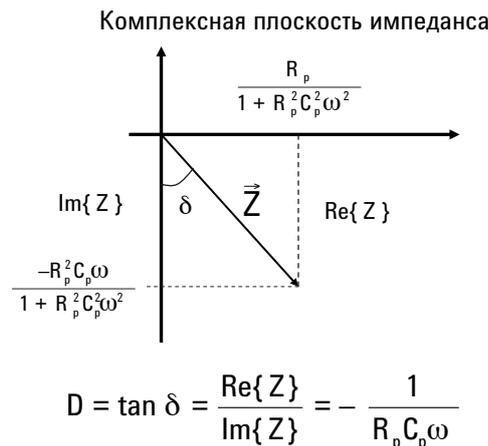
Можно выделить действительную и мнимую части импеданса:

$$\operatorname{Re}\{Z\} = \frac{R_p}{1 + R_p^2 C_p^2 \omega^2} \quad \operatorname{Im}\{Z\} = \frac{-R_p^2 C_p \omega}{1 + R_p^2 C_p^2 \omega^2}$$

Затухание (D) определяется отношением действительной части к мнимой:

$$D = \frac{\operatorname{Re}\{Z\}}{\operatorname{Im}\{Z\}} = \frac{\frac{R_p}{1 + R_p^2 C_p^2 \omega^2}}{\frac{-R_p^2 C_p \omega}{1 + R_p^2 C_p^2 \omega^2}} = -\frac{1}{R_p C_p \omega} \quad (\text{Уравнение 8.12})$$

Для тонкого подзатворного диэлектрика при больших токах утечки значение сопротивления эквивалентного параллельного резистора мало. Это означает, что ток, протекающий через конденсатор, уменьшается, поэтому его трудно измерить точно. Для увеличения тока через конденсатор (с затуханием D), требуется более высокая частота измерения, на которой импеданс конденсатора (равный  $1/C_p j\omega$ ) становится меньше. На комплексной плоскости импеданса меньшее значение  $R_p$  предполагает большее значение затухания D. Это означает, что точность измерения емкости ухудшается и увеличивается влияние внешних шумов. По этим причинам для измерений характеристик транзистора с тонким подзатворным слоем диэлектрика требуется более высокая частота измерений. Соотношения между  $R_p$ ,  $C_p$  и D показаны ниже.



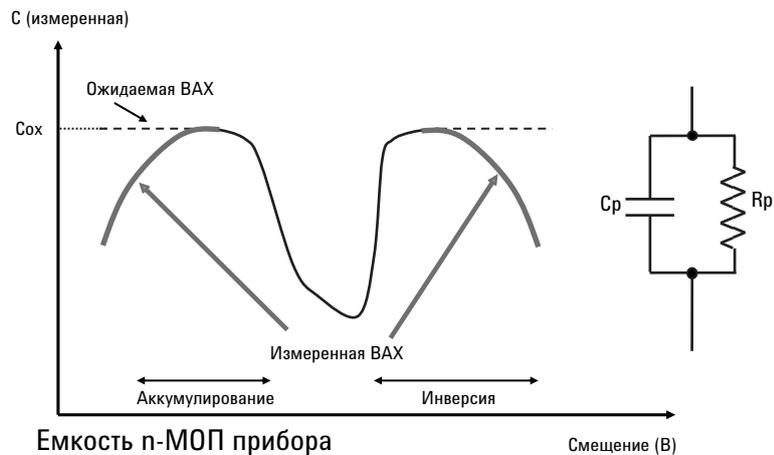
Чем меньше  $R_p$ ,  $\rightarrow$  тем больше  $D$

**Рис. 8.22.** Соотношение между параллельным сопротивлением ( $R_p$ ) и коэффициентом рассеяния ( $D$ )

**Примечание.** Приведенные выше результаты подразумевают, что затухание можно сделать сколь угодно малым за счет увеличения частоты. Однако, как мы увидим позже при обсуждении трехэлементной модели емкости, для устройств с тонким подзатворным слоем диэлектрика это не всегда верно.

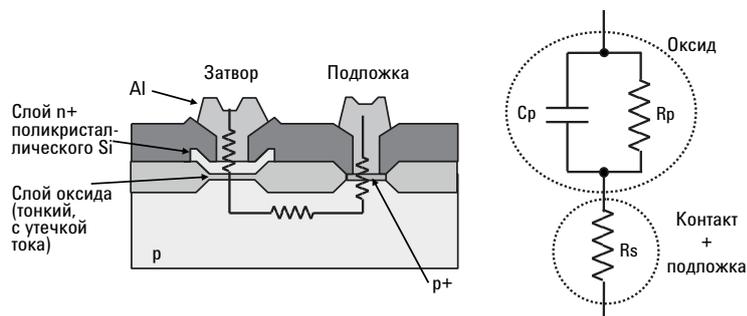
В большинстве измерителей емкости или анализаторов импеданса предусмотрена возможность построения графиков  $D$  в режиме реального времени. При обычной толщине слоя диэлектрика довольно часто значение  $D$  намного меньше 1 (это означает, что большая часть измеряемого тока проходит через конденсатор, а не через паразитный резистор). Однако если подзатворный диэлектрик тонкий, то ожидаемое значение  $D$  должно быть скорректировано. Даже увеличивая частоту, затухание  $D$  часто не удается уменьшить до значения, меньшего 1. Трудно обосновать четкое правило выбора значения затухания для приборов с тонким подзатворным диэлектриком, но как правило, значения менее 5 достаточно для достижения приемлемого результата измерения емкости.

Хотя понятно, что емкость затвора транзистора с тонким слоем подзатворного диэлектрика следует измерять на более высоких частотах, двухэлементная модель не позволяет объяснить результаты, наблюдаемые на высоких частотах.



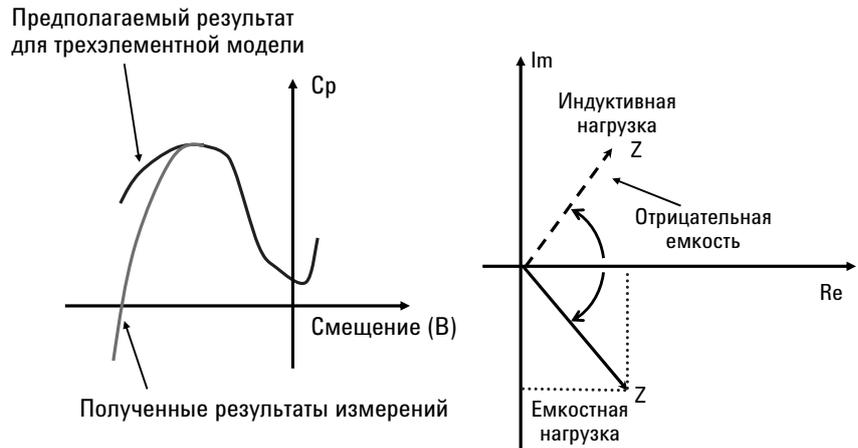
**Рис. 8.23.** Двухэлементная модель не позволяет объяснить результаты, получаемые при измерении на высоких частотах емкости затвора транзистора с тонким слоем подзатворного диэлектрика

Чтобы правильно учесть особенности тонкого подзатворного слоя диэлектрика транзистора, необходимо перейти к приведенной ниже трехэлементной модели конденсатора, в которую включено сопротивление, учитывающее наличие контактов и подложки.



**Рис. 8.24.** Трехэлементная модель конденсатора (содержащая сопротивление контакта и подложки)

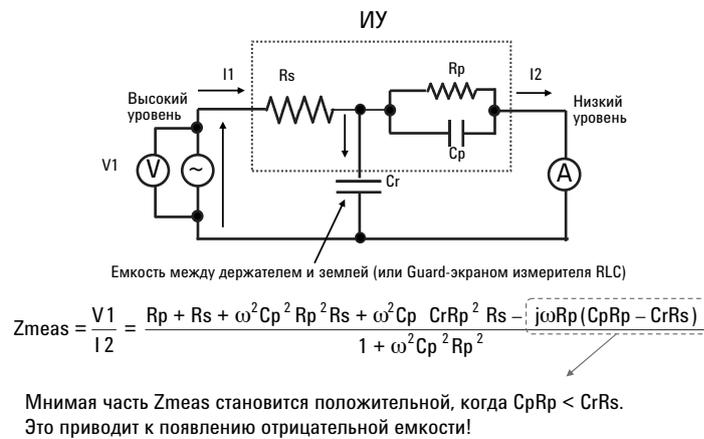
Для подзатворных диэлектриков обычной толщины эквивалентное параллельное сопротивление  $R_p$  гораздо больше последовательного сопротивления  $R_s$ . Поэтому при измерениях в диапазоне низких частот до 1 МГц сопротивлением  $R_s$  можно пренебречь. Это объясняет, почему раньше можно было использовать параллельную модель для более толстых диэлектриков затвора. Многие инженеры заметили, что при измерении тонкого слоя оксида затвора возникает что-то, похожее на «отрицательную емкость». Пример полученных результатов измерения показан ниже.



**Рис. 8.25.** Иллюстрация эффекта отрицательной емкости, наблюдаемого при измерении конденсаторов, образованных тонким слоем подзатворного диэлектрика

Отрицательная емкость проявляется, если мнимая часть измеренного импеданса имеет положительное значение. Обычно под положительной мнимой частью импеданса подразумевается индуктивность. В силу этого многие пытались объяснить наблюдаемую отрицательную емкость, как результат проявления индуктивности, вызванной кабелями зондовой станции или даже как результат генерации и рекомбинации электронов и дырок. Однако ни один из этих подходов не был успешным.

Специалисты Agilent обнаружили, что отрицательная емкость при измерении на пластине вызвана использованием методики с 4 парами выводов, а не самим измеряемым устройством. На следующей схеме показана вся измерительная система, в том числе держатель пластин.

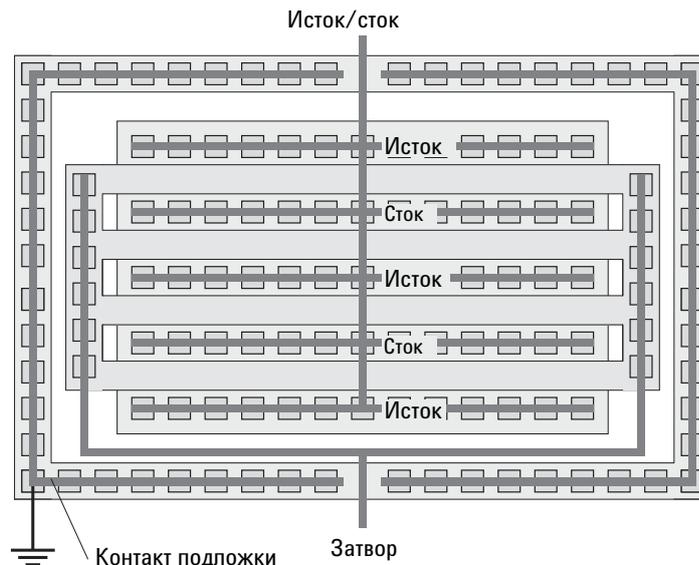


**Рис. 8.26.** Объяснение эффекта отрицательной емкости, наблюдаемого в тонком слое подзатворного диэлектрика

Ключевым моментом является то, что между держателем пластины и обратным трактом сигнала возникает емкостная связь (через наружный Shield-экран кабеля с BNC разъемом или землю). Когда используется четыре пары выводов, часть сигнала, протекающего через ИУ, проходит на держатель пластины за счет емкостной связи. В этом случае измеряемый импеданс описывается уравнением, показанным выше. Из уравнения следует, что если произведение  $C_p$  и  $R_p$  меньше произведения  $C_r$  и  $R_s$ , то мнимая часть измеренного импеданса становится положительной. Так как  $R_p$  возникает за счет прямого туннелирования электронов через диэлектрик затвора, то значение  $R_p$  быстро снижается с увеличением смещения на затворе. Это означает, что отрицательная емкость появляется, когда смещение на затворе достигает значения, при котором выполняется условие  $C_p \times R_p < C_r \times R_s$ . Проведенный анализ объясняет наблюдаемые результаты измерений при выполнении измерений ВФХ устройств с тонким слоем оксида затвора. **Примечание.** Лучший способ устранения этого эффекта заключается в совершенствовании тестовой структуры (минимизации  $R_s$ ), а не в совершенствовании методов измерений. Дополнительную информацию по этому вопросу можно найти в докладе И. Окавы (Y. Okawa) на международной конференции по тестовым структурам в микроэлектронике (ICMTS) 2003 г. «Влияние отрицательной емкости, возникающей за счет паразитной емкости измерительной системы, на измерение ВФХ устройств со сверхтонким слоем подзатворного диэлектрика».

*Оптимизация результатов измерений ВФХ за счет правильного проектирования тестовой структуры*

Чтобы повысить качество измерений, следует сделать сопротивление контакта ( $R_s$ ) как можно более низким. Из того, что было сказано ранее, вспомним, что проблемы начинают возникать, когда значение  $R_s$  становится сопоставимым с  $R_p$ . Таким образом, снижение  $R_s$  за счет грамотного проектирования структуры должно улучшить результаты наших измерений. Также вспомним, что если  $C_p \times R_p < C_g \times R_s$ , то появляется «отрицательная емкость». Таким образом, сводя к минимуму  $R_s$ , мы можем устранить этот эффект. На следующем рисунке представлен пример удачной тестовой структуры с минимальным  $R_s$ .



**Рис. 8.27.** Тестовая структура, позволяющая свести к минимуму  $R_s$  и устранить влияние отрицательной емкости

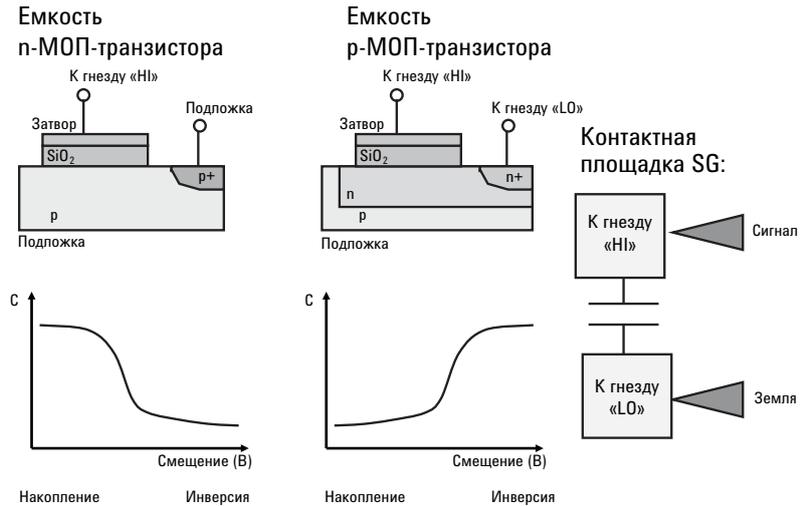
Рисунок не слишком подробный, поскольку детали этой структуры несущественны. Необходимо запомнить и выполнить следующие важные условия.

1. Сделать структуру симметричной
2. Создать много контактов, чтобы свести к минимуму сопротивление контакта и подложки
3. Для подключения к контактным площадкам использовать топологии «земля-сигнал» (GS) или «земля-сигнал-земля» (GSG)

**Примечание.** Использование тестовых структур подобного типа для минимизации значения  $R_s$  было впервые предложено Дж. Шмитцем (J. Schmitz) на международной конференции по тестовым структурам в микроэлектронике (ICMTS) 2003 г. в докладе «К вопросу о проектировании тестовой структуры для ВЧ измерений ВФХ в диэлектриках с утечкой».

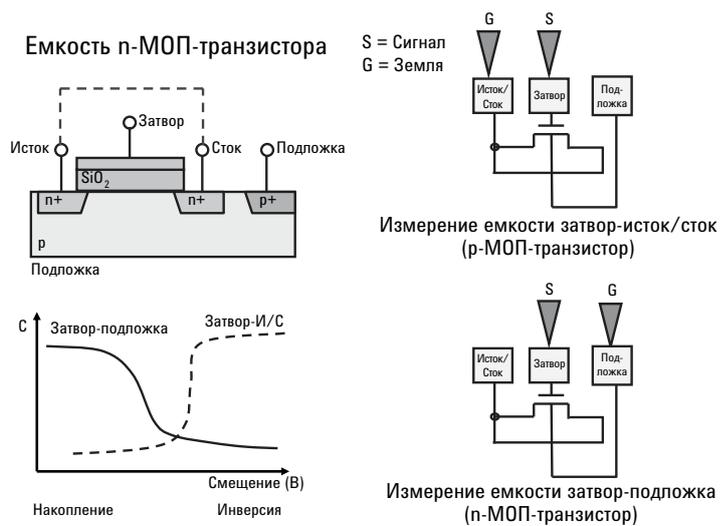
### Рассмотрение топологии контактных площадок

Как было сказано выше, чтобы получить хорошие результаты измерения емкости МОП-транзистора на высоких частотах, нужна соответствующая тестовая структура. Кроме структуры, важное значение имеет фактическая топология контактных площадок. Продуманная топология контактных площадок позволяет избежать многих проблем при выполнении измерений. Хотя для получения оптимальных результатов при высокочастотных измерениях емкости требуются ВЧ зонды, это не обязательно означает, что всегда нужны зонды с наконечниками «земля-сигнал-земля». На следующем рисунке показано два основных вида «конденсаторов» МОП-транзисторов (n-МОП и p-МОП), при измерения емкости которых требуются только зонды с наконечниками «земля-сигнал».



**Рис. 8.28.** Используя контактные площадки «сигнал-земля» (SG), можно выполнять простое свипирование (между затвором и подложкой) при измерении ВАХ для обоих типов транзисторов – n-МОП и p-МОП

Если вы хотите измерить обе емкости: затвор-подложка и затвор-сток/исток, то можно применить следующую схему (GSG), использующую одновременно только два зонда.

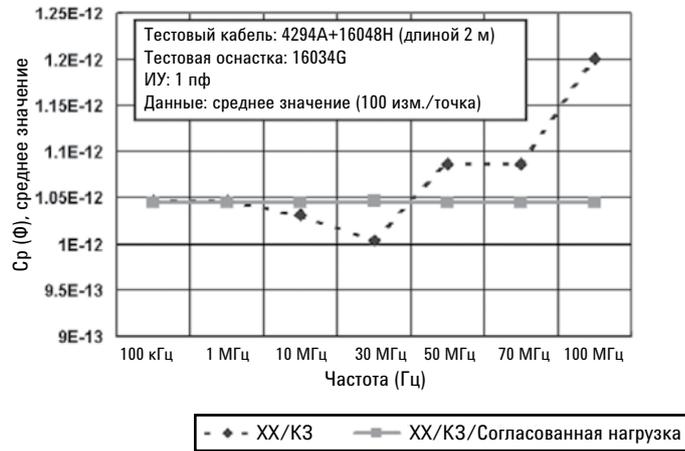


**Рис. 8.29.** С помощью тщательно разработанной топологии контактных площадок с тремя выводами (GSG) можно измерить обе емкости: затвор-подложка и затвор-сток/исток.

Вышеприведенная схема может сэкономить ваши деньги, поскольку зонд с наконечником типа GS дешевле, чем с наконечником GSG.

*Использование калибровочных мер XX/КЗ/Согласованная нагрузка*

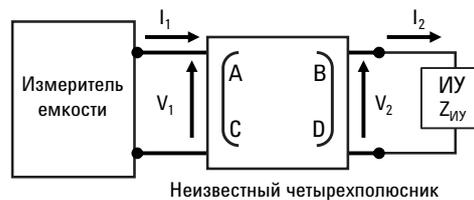
Как упоминалось ранее, на частотах 5 МГц простой калибровки с помощью мер XX/КЗ уже недостаточно, чтобы гарантировать точность измерений. На следующем графике для сравнения представлены результаты измерений, полученных с помощью метода подсоединения 4ТР на анализаторе импеданса Agilent 4294А (с диапазоном частот до 110 МГц) для обоих видов калибровки: с помощью калибровочных мер XX/КЗ и XX/КЗ/Согласованная нагрузка.



**Рис. 8.30.** Ошибка измерений, возникающая на более высоких частотах, если не проводится калибровка с помощью меры. «Согласованная нагрузка»

Дополнительная информация представлена в Рекомендациях по применению Agilent 4294-3 (номер публикации 5988-5102EN). Как видно из графиков, на частоте выше 5 МГц появляется существенная ошибка измерений, если помимо основной калибровки с помощью мер XX/КЗ не выполнена компенсация с помощью калибровочной меры «Согласованная нагрузка».

Схема компенсации с помощью калибровочных мер XX/КЗ, о которой упоминалось ранее, показана с упрощением. В реальной схеме компенсации с помощью калибровочных мер XX/КЗ/Согласованная нагрузка подключаемые кабели считаются неизвестным четырехполюсником, показанным на рисунке ниже. Истинное значение импеданса ИУ определяется по следующей формуле:



$$Z_{ИУ} = \frac{Z_{Std} (Z_0 - Z_{SM}) (Z_{XM} - Z_S)}{(Z_{SM} - Z_S) (Z_0 - Z_{XM})}$$

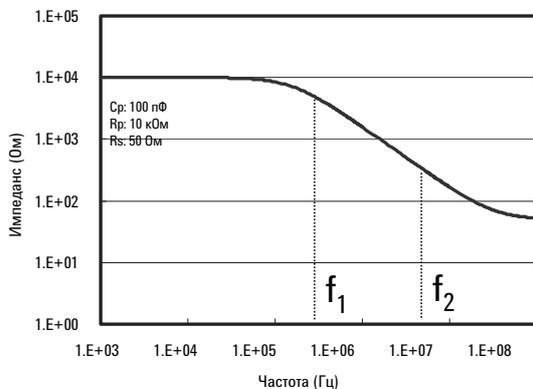
- $Z_0$  – Измеренное значение XX
- $Z_{SM}$  – Измеренное значение эталона ИУ
- $Z_{XM}$  – Измеренное значение ИУ
- $Z_S$  – Измеренное значение КЗ
- $Z_{Std}$  – Истинное значение эталона ИУ
- $Z_{ИУ}$  – Скорректированное значение ИУ

**Рис. 8.31.** Схема компенсации с помощью калибровочных мер XX/КЗ/Согласованная нагрузка фактически выполняет анализ неизвестного четырехполюсника между ИУ и измерителем емкости

Обратим особое внимание на то, что для выполнения калибровки с калибровочной мерой «Согласованная нагрузка» требуется хорошо откалиброванное эталонное сопротивление, и что такая калибровка должна проводиться на концах наконечника вашего зонда. Точность всех последующих высокочастотных измерений зависит от погрешности эталона нагрузки, поэтому очень важно использовать эталон с известными характеристиками. Именно поэтому компании-поставщики исследовательских зондовых станций, поддерживающих ВЧ зондирование, обычно поставляют еще и калибровочные меры. Кроме того, следует помнить, что для целей калибровки следует использовать одну и ту же калибровочную пластину, содержащую XX/КЗ/Согласованную нагрузку. В противном случае вы получите неточные результаты измерений. Например, при использовании проб-карт одной из распространенных ошибок является выполнение компенсации с помощью калибровочных мер XX/КЗ на наконечниках зонда, а затем выполнение компенсации нагрузки с помощью специального эталона нагрузки, встроенного в проб-карту. Однако поскольку во всех трех случаях калибровочная плоскость разная, то на высоких частотах результаты измерений будут неточными.

#### Расчет параметров трехэлементной модели конденсатора

Очевидно, что для трехэлементной модели конденсатора требуется определить три параметра:  $C_p$ ,  $R_p$  и  $R_s$ . Хотя может показаться, что для этого потребуются три измерения, на самом деле это не так. Вспомним, что при каждом измерении импеданса мы получаем данные о двух параметрах: амплитуде и фазе. Это означает, что после двух измерений импеданса фактически мы получаем четыре группы данных, чего более чем достаточно для определения трех неизвестных параметров. Эта концепция может быть применена к трехэлементной модели конденсатора: нужно измерить емкость и затухание на двух различных частотах и выполнить приведенные ниже вычисления.



$$C_p = \frac{f_1^2 C_1 (1 + D_1^2) - f_2^2 C_2 (1 + D_2^2)}{f_1^2 - f_2^2}$$

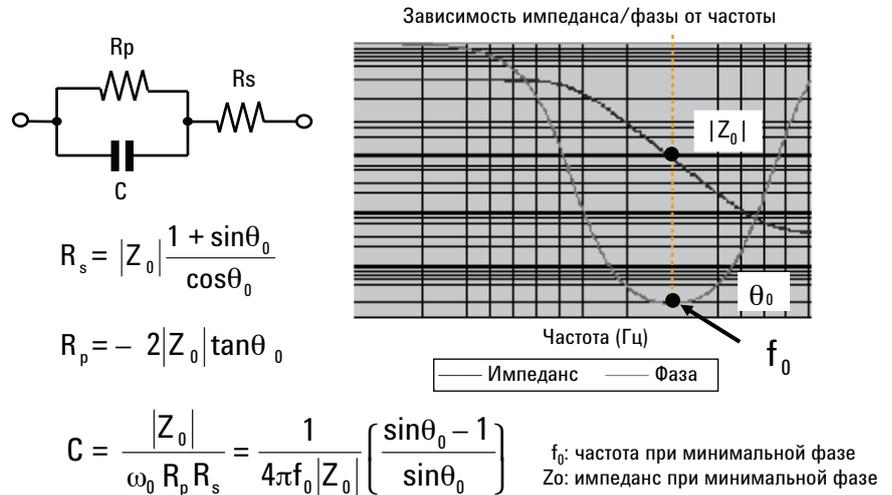
$$R_p = \frac{1}{\sqrt{\omega_1^2 C_1 C_p (1 + D_1^2) - \omega_1^2 C_p^2}} = \frac{1}{\sqrt{\omega_2^2 C_2 C_p (1 + D_2^2) - \omega_2^2 C_p^2}}$$

$$R_s = \frac{D_1}{\omega_1 C_1 (1 + D_1^2)} - \frac{R_p}{1 + \omega_1^2 C_p^2 R_p^2} = \frac{D_2}{\omega_2 C_2 (1 + D_2^2)} - \frac{R_p}{1 + \omega_2^2 C_p^2 R_p^2}$$

- $C_1$ : измеренная емкость параллельной модели на частоте  $f_1$
- $D_1$ : измеренное затухание параллельной модели на частоте  $f_1$
- $C_2$ : измеренная емкость параллельной модели на частоте  $f_2$
- $D_2$ : измеренное затухание параллельной модели на частоте  $f_2$

**Рис. 8.32.** Двухчастотный метод расчета параметров трехэлементной модели конденсатора для затвора с тонким слоем оксида

К сожалению, двухчастотный метод, как было показано, ненадежен при вычислении параметров трехэлементной модели конденсатора для затвора с тонко-слоистым оксидом (см. доклад Р. Клерка на конференции INFOS 2001). Поэтому был предложен альтернативный метод, включающий построение зависимости сопротивления и фазы от частоты с целью получения значения минимального фазового угла и импеданса, соответствующего этой точке (см. рисунок ниже).



**Рис. 8.33.** Метод минимальной фазы является предпочтительным при расчете параметров трехэлементной модели конденсатора

Дополнительная информация представлена в Рекомендациях по применению Agilent 4294-3 (номер публикации 5988-5102EN).

Интересной особенностью трехэлементной модели конденсатора является то, что применение более высокой частоты не обязательно приводит к снижению значения затухания (D). Эквивалентное сопротивление в случае трехэлементной модели состоит из параллельной комбинации  $R_p$  и  $R_s$ , последовательно соединенной с  $R_s$ . Вернувшись к уравнениям 8.11 и 8.12 мы видим, что эквивалентное сопротивление трехэлементной модели определяется по формуле:

$$Z = R_s + \frac{R_p - R_p^2 C_p j\omega}{1 + R_p^2 C_p^2 \omega^2} \quad (\text{Уравнение 8.13})$$

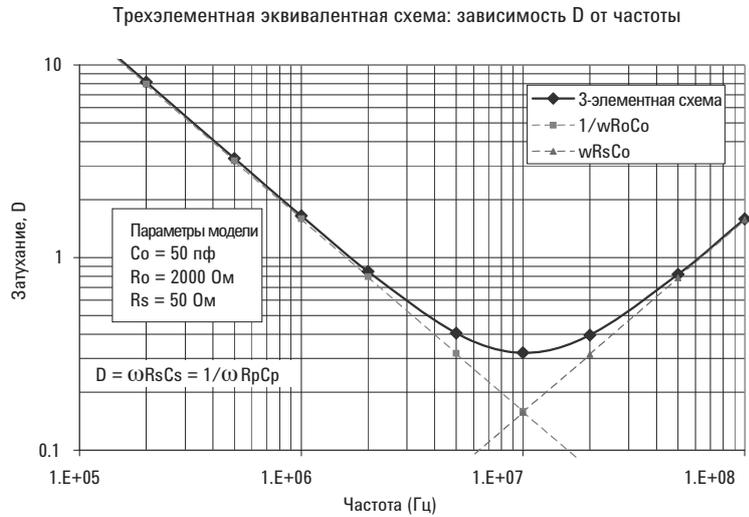
Можно разделить действительную и мнимую части импеданса:

$$\text{Re}\{Z\} = R_s + \frac{R_p}{1 + R_p^2 C_p^2 \omega^2} \quad \text{Im}\{Z\} = \frac{-R_p^2 C_p \omega}{1 + R_p^2 C_p^2 \omega^2}$$

Как и ранее, затухание (D) определяется отношением действительной части к мнимой:

$$D = \frac{\text{Re}\{Z\}}{\text{Im}\{Z\}} = \frac{\frac{R_s(1 + R_p^2 C_p^2 \omega^2) + R_p}{1 + R_p^2 C_p^2 \omega^2}}{\frac{-R_p^2 C_p \omega}{1 + R_p^2 C_p^2 \omega^2}} = -\frac{R_s(1 + R_p^2 C_p^2 \omega^2) + R_p}{R_p^2 C_p \omega} \quad (\text{Уравнение 8.14})$$

В отличие от двухэлементной модели, реальное затухание не постоянно уменьшается с увеличением частоты, а имеет экстремум в виде минимального значения. Следующий график зависимости затухания от частоты для трехэлементной модели конденсатора иллюстрирует эту особенность.



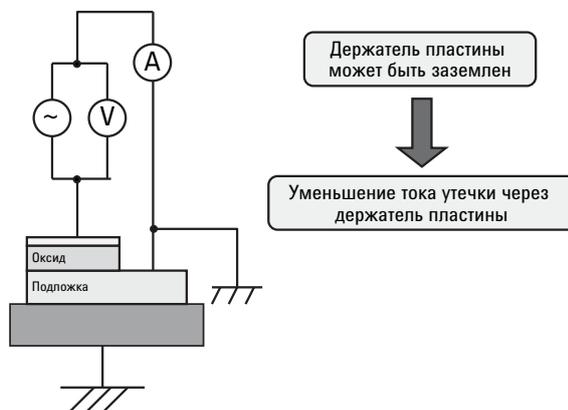
**Рис. 8.34.** Из графика для трехэлементной модели конденсатора видно, что произвольное увеличение частоты не обязательно приводит к снижению значения затухания

Поэтому на практике для определения оптимальной частоты для выполнения измерений может потребоваться сделать ряд предварительных измерений.

**Примечание.** Такая характеристика была впервые документально подтверждена Г. Брауном (G. Brown) в докладе на международной конференции по тестовым структурам в микроэлектронике (ICMETS) 2005 г. «Измерение емкостных характеристик при разработке интегральных схем: тесная взаимосвязь тестовой структуры, эквивалентной схемы и методологии измерений».

#### Усовершенствованный метод измерения ВАХ

Метод измерений со схемой подключения 4ТР имеет ограничения. По мере увеличения частоты, на результаты измерений начинает влиять не только емкость, но и остаточная индуктивность держателя. Лучшим средством минимизации этих воздействий является заземление держателя пластин, но как уже упоминалось ранее, для метода 4ТР требуется, чтобы держатель пластин был изолированным от земли. По этой причине компания Agilent разработала альтернативное решение для оснастки, используемой при проведении высокочастотных измерений на пластине, известное как «усовершенствованный метод измерения ВАХ». См. рисунок ниже.



**Рис. 8.35.** Усовершенствованный метод измерения ВАХ позволяет заземлить держатель пластины, в результате чего через него протекает меньший ток утечки за счет остаточной емкости и индуктивности

Усовершенствованный метод измерения ВАХ имеет следующие преимущества.

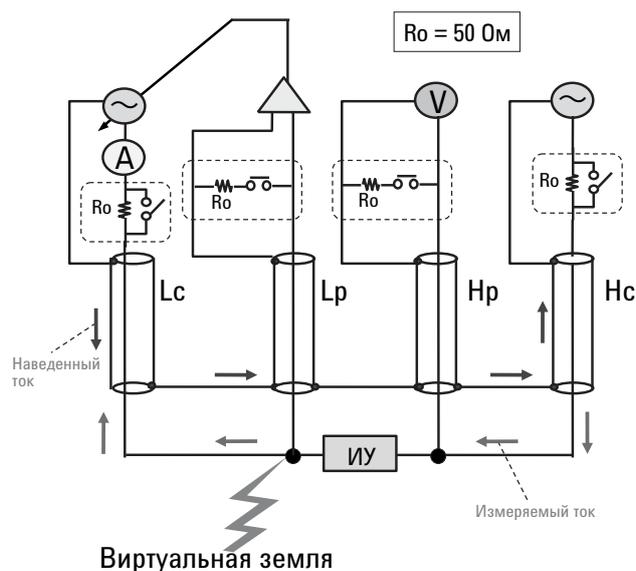
1. У измерителя тока заземлено гнездо «LO» .
2. Источник напряжения и измеритель напряжения имеют гальваническую развязку.
3. Поддерживаются измерения на частотах вплоть до 110 МГц.

Для усовершенствованного метода измерения ВАХ требуются прецизионный анализатор импеданса Agilent 4294A и зонд анализатора импеданса Agilent 42941A, показанные ниже. Вы не можете использовать зонд 42941A с измерителем LCR E4980A.



**Рис. 8.36.** Прецизионный анализатор импеданса 4294A и зонд анализатора импеданса 42941A необходимы для выполнения усовершенствованного метода измерения ВАХ при снятии ВФХ

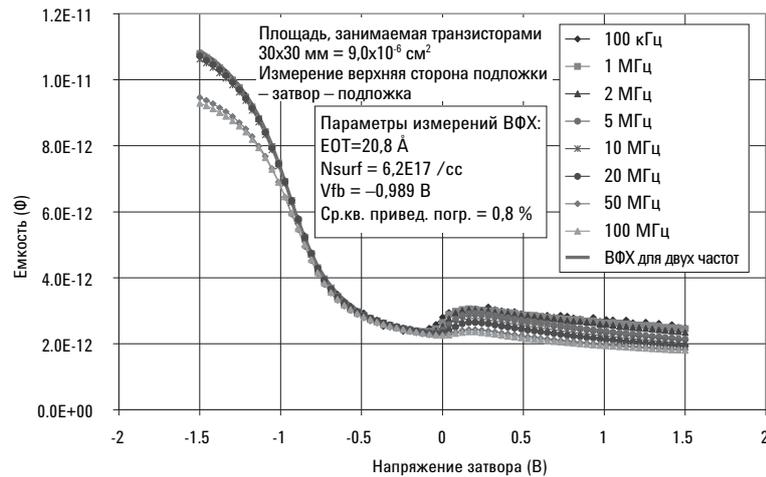
Анализатор 4294A обладает рядом особенностей, о которых должно быть известно всем пользователям. Одной из них является функция, известная как «мостовой метод с автоматической балансировкой и кабелями с оконечной нагрузкой». По сути это означает, что в измерительную цепь прибора 4294A включаются 50-омные резисторы оконечной нагрузки, чтобы уменьшить амплитуду отраженных сигналов на частоте от 5 МГц. Резисторы подключаются, когда к анализатору подсоединяют кабели длиной 1 или 2 метра (которые, конечно, всегда используются при проведении измерений на пластине). Функция иллюстрируется следующим рисунком.



**Рис. 8.37.** Если с анализатором 4294A используются кабели длиной 1 или 2 метра, то внутри прибора подключаются 50-омные резисторы, чтобы уменьшить амплитуду отраженных сигналов на частоте от 5 МГц

Если калибровка нагрузкой выполняется на частоте 5 МГц, то на этой частоте будет наблюдаться нарушение непрерывности измерений. Поэтому при компенсации влияния нагрузки в анализаторе 4294A важно убедиться, что частота 5 МГц включена в список частот, на которых выполняется компенсация.

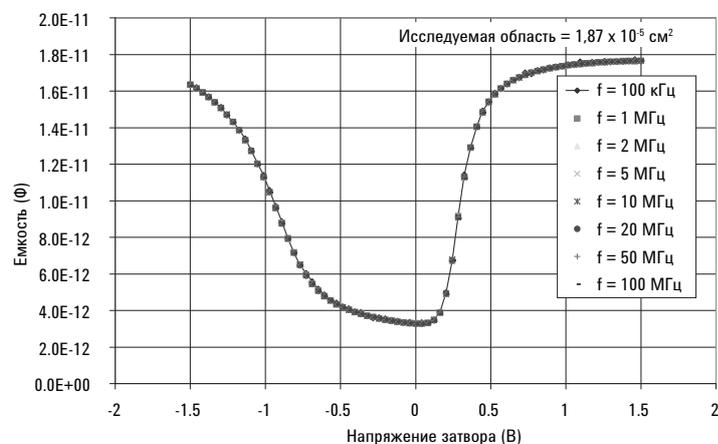
Чтобы получить удовлетворительные результаты измерений на сверхтонких слоях оксидов затвора, как правило, требуются и применение усовершенствованного метода измерения ВФХ, и правильно разработанная тестовая структура. На графике ниже показаны результаты измерений на традиционной тестовой структуре с контактными площадками «земля-сигнал-земля» (GSG) при использовании усовершенствованного метода измерения ВФХ.



**Рис. 8.38.** Результаты измерений, полученных на различных частотах при использовании усовершенствованного метода измерения ВФХ на обычной тестовой структуре (с контактными площадками GSG).

[Примечание. Данные любезно предоставлены компанией SEMATECH]

Как показано на графике, результаты измерений варьируются в зависимости от частоты, а характеристики устройства не соответствуют QSCV в области инверсии. В отличие от этого, на следующем графике представлены результаты измерений на основе тестовой структуры с контактными площадками «земля-сигнал-земля» (GSG) и с использованием усовершенствованного метода измерения ВФХ, а также тестовой структуры с минимальным последовательным сопротивлением (Rs).



**Рис. 8.39.** Результаты измерений, полученных на различных частотах, при использовании усовершенствованного метода измерения ВФХ на тестовой структуре, минимизирующей последовательное сопротивление (с топологией контактных площадок GSG).

[Примечание. Данные любезно предоставлены компанией SEMATECH]

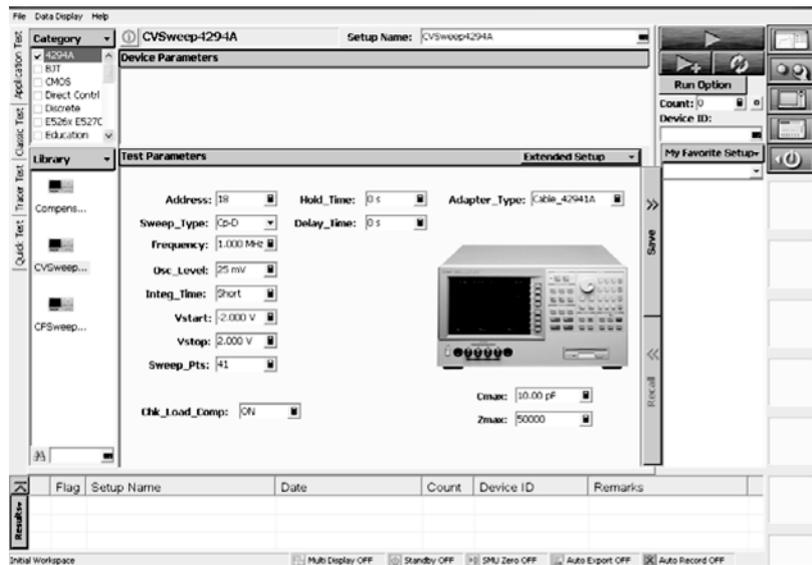
Результаты измерений показывают отличную корреляцию на различных частотах измерения. То же самое касается характеристики QSCV в области инверсии, хотя вычисленная электрическая толщина оксида составляет 2 нанометра! Всё это подчеркивает важность использования правильно сконструированной тестовой структуры при проведении измерения емкости на сверхтонких оксидах затвора.

#### *Управление анализатором 4294А с помощью ПО EasyEXPERT*

Интерфейс пользователя анализатора 4294А панели достаточно сложный из-за многочисленных подменю. Кроме того, пара особенностей этого анализатора иногда заставляет пользователей совершать неумышленные ошибки. Первая из них заключается в том, что, в отличие от B1500A/B1505A и E4980A, анализатор 4294А не сохраняет информацию о компенсации влияния кабелей после отключения от сети питания. Одно из решений проблемы – обязательное выполнение компенсации с помощью калибровочных мер XX/K3/Согласованная нагрузка при каждом включении питания 4294А, хотя это может показаться несколько утомительным. К счастью, 4294А имеет встроенную флэш-память, в которую можно сохранить файл данных о компенсации для восстановления после включения питания; однако пользователь должен не забывать проделывать эту операцию. Вторая проблема 4294А состоит в том, что многие его параметры, используемые по умолчанию, не подходят для измерения емкости полупроводников. А изменять все настройки по умолчанию каждый раз при включении прибора несколько утомительно; кроме того, при этом легко что-нибудь забыть или ошибиться.

Чтобы решить эти проблемы, компания Agilent предлагает пакет тестовых приложений EasyEXPERT для управления 4294А. Одно из таких приложений направляет действия пользователя при выполнении процедур калибровки с помощью мер XX/K3 и «Согласованная нагрузка» (опционально) анализатора 4294А. После завершения процедуры калибровки приложение сохраняет файл данных калибровки во флэш-память. Другие приложения для тестирования управляют свипированием для снятия ВФХ на постоянном токе и построения зависимости емкости от частоты (С-f). Важно отметить, что оба эти приложения сначала проверяют наличие сохраненных файлов калибровки, созданных калибровочными приложениями. Если эти файлы отсутствуют, то приложение выдает сообщение, о том, что сначала следует выполнить компенсацию длины кабеля, после чего прекращает свою работу. А если файл с калибровочными данными существует, то приложения для измерения ВФХ и С-f автоматически загружают эту информацию в анализатор. Кроме того, приложения для измерения ВФХ и С-f сами вносят необходимые изменения в настройки по умолчанию, позволяющие измерять емкость полупроводников. Таким образом, эти приложения практически исключают возможность использования неверных данных калибровки и настройки. И наконец, эти приложения облегчают хранение и экспорт результатов тестирования в форматах, используемых в ПК, что невозможно выполнить с передней панели прибора 4294А.

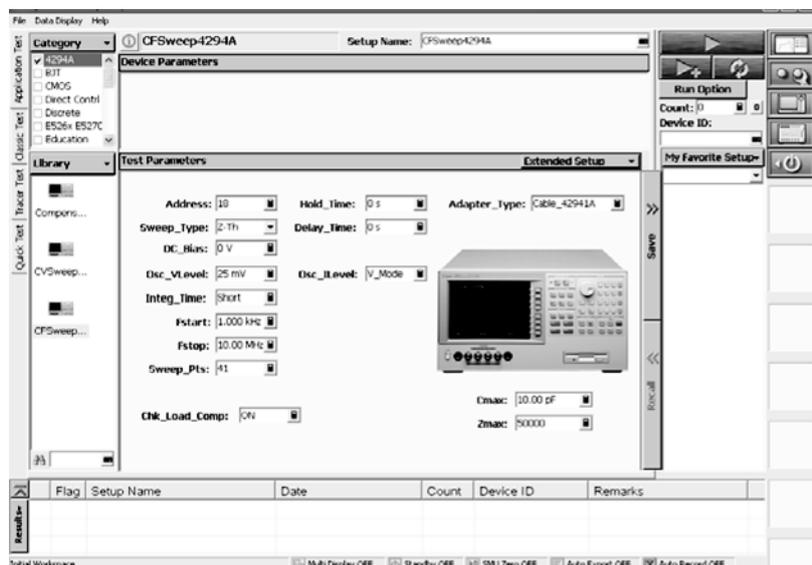
Ниже показан снимок экрана тестового приложения EasyEXPERT для измерения ВФХ на анализаторе 4294А.



**Рис. 8.40.** Приложение EasyEXPERT для свипирования при снятии ВФХ на постоянном токе с помощью 4294А

Это приложение для тестирования обеспечивает контроль всех основных параметров свипирования при снятии ВФХ на 4294А. Если вы не можете или не хотите проверить компенсацию по Согласованной нагрузке, то можно отключить выполнение функции «Chk\_Load\_Comp» (проверить компенсацию по Согласованной нагрузке), выбрав значение «OFF» (откл.). Теперь приложение не будет проверять наличие сохраненного файла калибровки, чтобы определить, была ли выполнена компенсация по Согласованной нагрузке. **Примечание.** Возможность программной регулировки параметра «Integ\_Time» (время интегрирования) действительно упрощает настройку 4294А, поскольку сам этот прибор не управляет временем интегрирования, в отличие, например, от анализатора В1500А. И для подавляющего большинства пользователей эта функция расширяет возможности использования 4294А.

Ниже показан снимок экрана приложения EasyEXPERT для измерения зависимости С-ф.



**Рис. 8.41.** Приложение EasyEXPERT для свипирования при снятии зависимости емкости от частоты с помощью 4294А

Основные функции этого тестового приложения аналогичны приложению для свипирования ВФХ. Разница состоит в том, что оно позволяет пользователю установить генератор переменного тока в режим генерации напряжения или тока. Для неиспользуемого режима (название режима появляется автоматически: «V\_Mode» – режим напряжения, или «I\_Mode» – режим тока) следует выставить значение уровня сигнала, равное «0». Еще одно различие заключается в том, что значения емкости отображаются в линейном масштабе, а частоты – в логарифмическом.

*Практические рекомендации по измерению емкости тонких диэлектриков затвора*

Ниже приведены основные рекомендации для измерения емкости транзисторов с тонкими диэлектриками затвора.

1. Перед проведением каких-либо измерений следует выполнить калибровку с помощью мер ХХ/КЗ/Согласованная нагрузка (после выполнения фазовой компенсации, если эта функция поддерживается).
2. Следует использовать достаточно высокие частоты, чтобы свести к минимуму затухание и выдержать необходимую точность измерений.
3. Для получения параметров следует использовать трехэлементную модель устройства.
4. Следует уделить особое внимание влиянию держателя пластины и тщательно проработать тестовую структуру (минимизировать  $R_s$ ).
5. Если подключение кабелей по методу 4TP не дает удовлетворительных результатов, то попробуйте использовать усовершенствованный метод измерения ВАХ.

Метод измерений	Точка контакта зонда	Прибор	Примечания
4TP	Пластина или держатель (держатель предпочтительнее)	E4980A, B1500A, B1505A, 4294A	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Сложная настройка</li> <li>● Макс. частота ~30 МГц</li> </ul>
Усовершенствованное измерение ВАХ	Пластина	4294A + 42941A	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Простая настройка</li> <li>● Макс. частота до 110 МГц</li> <li>● Необходим ВЧ зонд</li> </ul>

**Рис. 8.42.** Таблица сравнения метода измерения 4TP и усовершенствованного метода измерения ВАХ

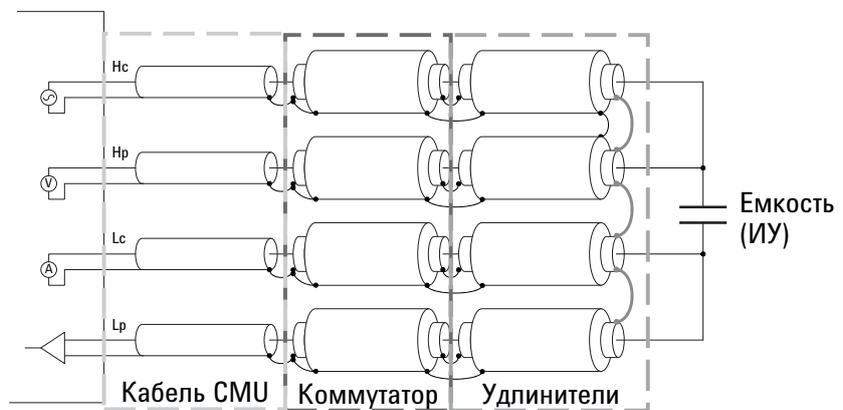
## Измерения емкости с помощью матричного коммутатора

В параметрическом тестировании существует старая проблема под названием «дилемма измерения ВАХ-ВФХ». Она связана с тем, что для измерения ВФХ и ВАХ требуются разные кабели. Для измерения емкости требуются кабели с разъемом BNC, а для измерения ВАХ – триаксиальные, хотя в большинстве параметрических тестов требуются измерять и ВАХ, и ВФХ. Ручное переключение с триаксиальных кабелей на BNC (и обратно) крайне утомительно и к тому же не допускает какого-либо рода автоматизации тестирования. Очевидно, что одним из решений этой проблемы является использование матричных коммутаторов (см. главу 4). Однако введя матричный коммутатор в тракт измерения для переключения с триаксиальных кабелей на BNC, мы решаем одну проблему и создаем несколько новых. Поэтому в данном разделе мы обсудим, как правильно измерять емкость с помощью матричных коммутаторов.

### *Проблемы измерения емкости с использованием матричных коммутаторов*

Обсуждая в главе 4 вопросы измерений на пластине, мы рассмотрели решения для коммутации сигналов при измерении ВАХ и ВФХ в случае применения зондовых позиционеров. Там говорилось о том, что в этих решениях предусмотрены встроенная компенсация емкости (для выводов ASU и SCUU) и средства для замыкания между собой линий экранов в процессе измерения емкости для стабилизации последовательной индуктивности кабелей. Однако должно быть ясно, что выполнять эти действия на матричном коммутаторе гораздо сложнее. Решения с позиционерами имеют преимущество за счет фиксированной длины кабеля; а при использовании матричного коммутатора нужно учитывать длину тракта сигнала и нагрузки, которые меняются каждый раз, когда переключаются контакты реле.

На рисунке ниже выделены три участка, которые отдельно рассматриваются при измерении емкости через матричный коммутатор.



**Рис. 8.43.** При измерении емкости через матричный коммутатор рассматриваются три участка: кабель СМУ, коммутатор и удлинители

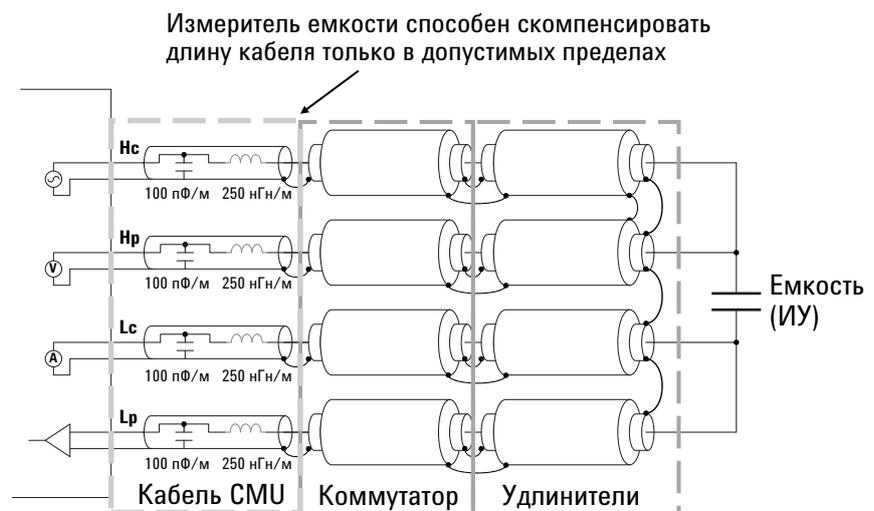
При измерении емкости через матричный коммутатор большая часть ошибок возникает по следующим причинам:

1. Для соединения измерителя емкости с матричным коммутатором используются нестандартные кабели СМУ или кабель неподдерживаемой длины.
2. Экраны не замкнуты между собой вблизи ИУ.
3. Кабельные удлинители вызывают рассогласование импеданса кабеля.
4. Матричный коммутатор не поддерживает схемы компенсации, которые учитывают изменения в нагрузке и длине тракта из-за подключения и отключения соединений вход-выход.

Рассмотрим средства для ослабления влияния этих факторов.

#### Компенсация влияния кабеля СМУ

Хотя мы уже достаточно широко обсуждали проблему компенсации влияния кабеля измерителя емкости, стоит еще раз повторить некоторые важные моменты, поскольку дойдя до подключения матричного коммутатора, вы вполне могли о них позабыть. Одним из ключевых моментов является длина кабелей измерителя емкости. Выбор правильной длины очень важен для балансировки моста в измерительной цепи измерителя емкости. Если используется кабель нестандартной длины, то измеритель емкости скорее всего не сможет сбалансировать свой мост и в процессе компенсации возникнет ошибка.



**Рисунок 8.44.** Использование нестандартного кабеля СМУ или кабеля ненадлежащей длины – распространенные причины недостоверных результатов измерений емкости через матричный коммутатор

На рисунке ниже описана процедура компенсации влияния кабелей между измерителем емкости и матричным коммутатором.

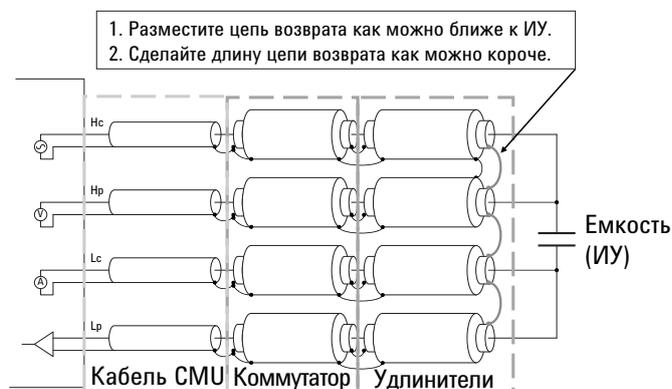


**Рис. 8.45.** Правильная процедура компенсации влияния кабелей между измерителем емкости и матричным коммутатором

Для подключения к матричному коммутатору очень важно использовать кабели, поставляемые компанией Agilent. Кроме того, что кабели Agilent имеют нужную длину для надлежащей компенсации, они были изготовлены и испытаны на соответствие известным стандартам качества, а их волновое сопротивление известно. Если вы попытаетесь использовать какой-либо другой стандартный кабель с разъемом BNC, то компания Agilent не может гарантировать точность измерений, даже если будет выполнена процедура компенсации и будет казаться, что измерения проведены корректно. Анализатор Agilent E4980A поддерживает кабели длиной 1 м, 2 м и 4 м. Модуль многочастотного измерения емкости (MFCMU) анализатора V1500A поддерживает кабели длиной 1,5 м и 3 м. Для подключения к коммутатору следует использовать максимально короткий кабель.

#### Замыкание линий Guard-экрана между собой

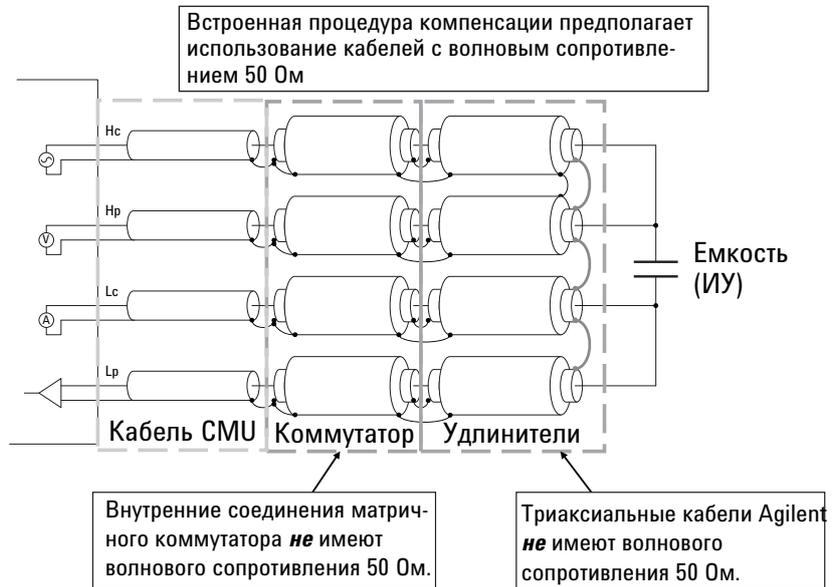
Хотя в главе 4 мы уже обсуждали причины необходимости замыкания между собой линий Guard-экрана при измерении емкости, рассмотрим их вкратце еще раз. Внешние экраны кабелей с разъемами BNC, идущих от измерителя емкости, не находятся под потенциалом земли, но они «заземлены виртуально». Линии Guard-экрана замыкаются между собой при измерении емкости, чтобы стабилизировать последовательную индуктивность измерительного тракта. Если линии Guard-экрана не замкнуты, то последовательная индуктивность может изменяться от 250 нГн/м до более чем 400 нГн/м. Такие существенные изменения последовательной индуктивности измерительного тракта делают стабильную компенсацию емкости практически невозможной.



**Рис. 8.46.** Указания по поводу замыкания между собой линий Guard-экрана во время измерения емкости

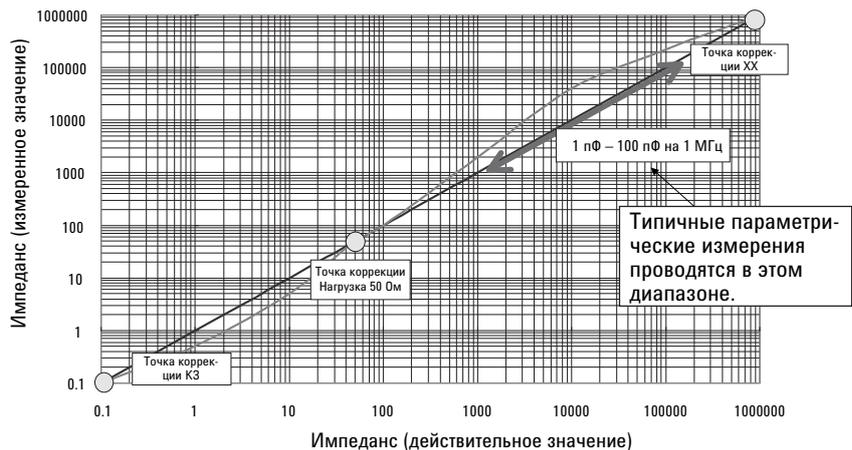
### Рассогласование импеданса

Измеритель емкости рассчитан на использование 50-омных кабелей при выполнении компенсации с помощью калибровочных мер ХХ/КЗ/Согласованная нагрузка. К сожалению, ни матричный коммутатор, ни удлинительный кабель не обладают волновым сопротивлением 50 Ом. Это влияет на точность компенсации.



**Рис. 8.47.** Одна из основных проблем заключается в том, что ни матричный коммутатор, ни удлинительный кабель не обладают волновым сопротивлением 50 Ом

В идеале импеданс «Согласованной нагрузки» должен быть в том же диапазоне, что и импеданс измеряемого устройства. Однако для полупроводниковых проборов это невыполнимо. К сожалению, типичный входной импеданс полупроводниковых приборов намного выше 50 Ом. Это влияет на точность компенсации с помощью калибровочной меры «Согласованная нагрузка».



**Рис. 8.48.** Неточность результатов измерений емкости полупроводниковых приборов из-за их высокого импеданса.

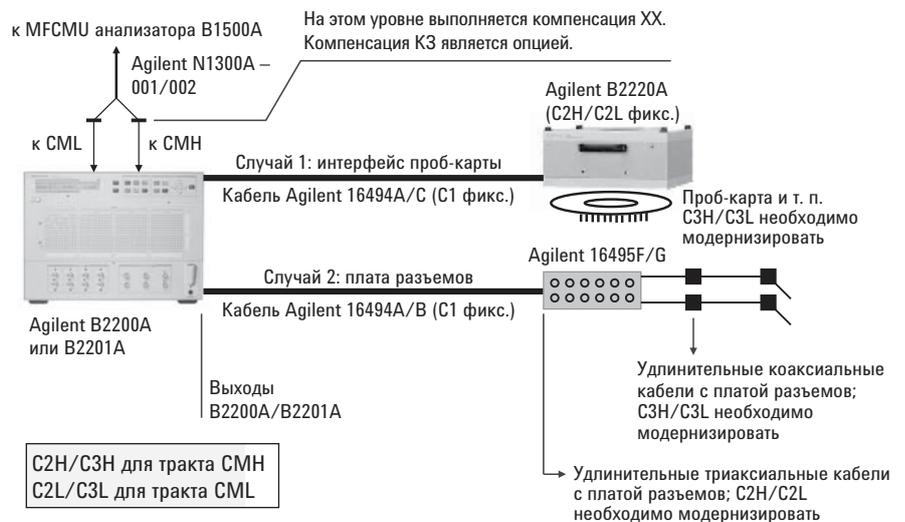
### Использование матричного коммутатора Agilent

Agilent предлагает полнофункциональное решение для измерения ВФХ и ВАХ, которое компенсирует влияние кабелей и всей оснастки, вплоть до наконечников проб-карт. Помимо усовершенствованного измерения ВФХ, это решение также обеспечивает превосходные характеристики при измерении слабых токов.



**Рис. 8.49.** Интегрированное решение Agilent для измерения ВАХ и ВФХ с помощью матричного коммутатора

Ниже представлено более подробное описание решения.



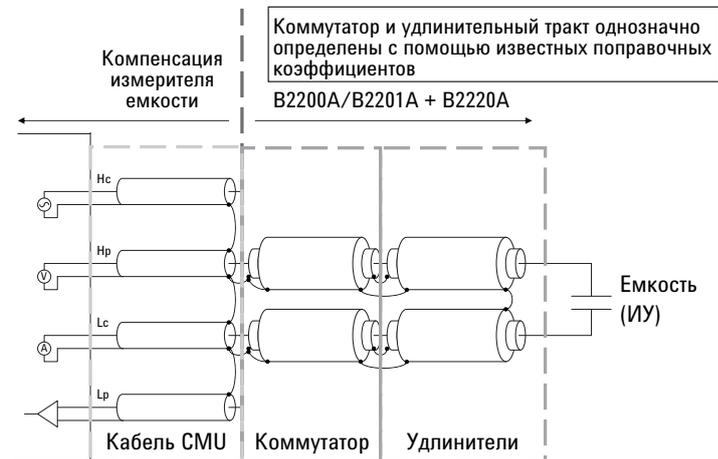
**Рис. 8.50.** Утилита EasyEXPERT для компенсации влияния коммутатора B2200A/B2201A имеет встроенные компенсационные данные для обоих показанных выше случаев

Далее приводятся описания соединительных элементов, использованных в схеме, представленной на рисунке выше.

- B2220A-024/048: интерфейс проб-карты (24 контакта/48 контактов)
- N1300A-001/002: кабель СМУ для B1500A (1,5 м/3,0 м)
- 16494A-002/005: триаксиальный кабель (3,0 м/4,0 м)
- 16494B-001/002: триаксиальный кабель Кельвина для 16495F/G (1,5 м/3,0 м)
- 16494C-002/005: триаксиальный кабель Кельвина для B2220A (3,0 м/4,0 м)
- 16495F: панель разъемов с 12 триаксиальными, соединительными и GNDU-разъемами
- 16495G: панель разъемов с 24 триаксиальными, соединительными и GNDU-разъемами

Кроме интерфейса проб-карты B2220A или панели разъемов 16495F/G, EasyEXPERT позволяет использовать и другие варианты соединений. Однако в этом случае понадобится откалибровать вашу оснастку и создать собственный файл данных компенсации. Описание этого процесса доступно через меню «справка» в EasyEXPERT.

Данное решение работает, поскольку коммутатор и удлинители однозначно определены с помощью известных поправочных коэффициентов. EasyEXPERT будет поддерживать такую автоматическую компенсацию до частоты 1 МГц.

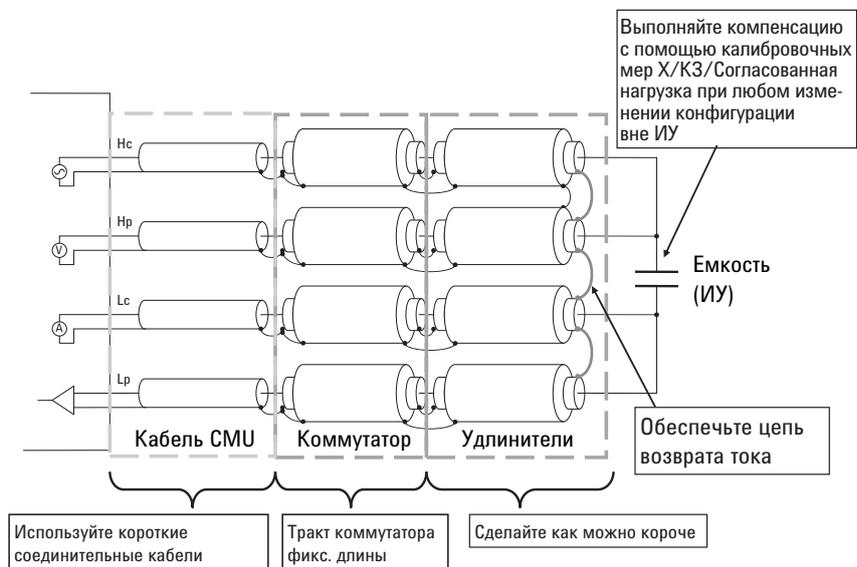


**Рис. 8.51.** Упрощенное изображение схемы компенсации матричного коммутатора Agilent.

### Рекомендации для выполнения измерений на частоте более 1 МГц

Вначале обратим ваше внимание на то, что Agilent не дает каких-либо гарантий успешного проведения измерения емкости с помощью любого из наших матричных коммутаторов на частоте более 1 МГц. Эти измерения не поддерживаются. Однако, если вам необходимо, то мы можем предложить некоторые рекомендации, чтобы повысить ваши шансы на успех. Вот о чем нужно помнить при использовании матричных коммутаторов на частотах выше 1 МГц:

1. Корректная работа измерителя емкости ограничивается максимально поддерживаемой длиной кабеля. Если общая длина используемых кабелей (соединительный кабель + тракт коммутатора + удлинители) превышает длину кабеля, поддерживаемую вашим измерителем емкости, то компенсация с помощью калибровочных мер ХХ/КЗ/Согласованная нагрузка не будет выполнена (вы получите сообщение «мост несбалансирован»).
2. При каждом изменении настроек коммутатора длина измерительного тракта меняется. Следует выполнять компенсацию с помощью калибровочных мер Х/КЗ/Согласованная нагрузка при каждой смене настроек коммутатора.
3. Вы должны обеспечить цепь возврата тока вблизи ИУ.



**Рис. 8.52.** Рекомендации по использованию матричного коммутатора на частоте более 1 МГц

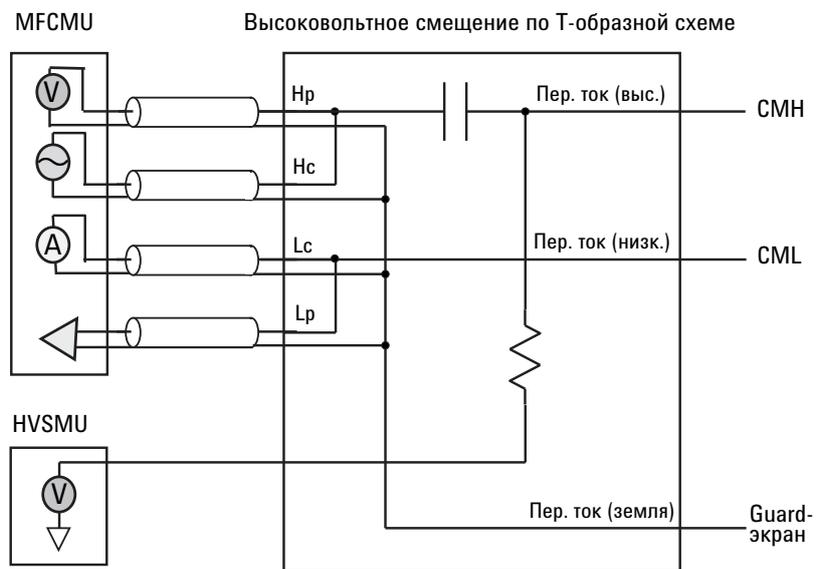
Хотя успешное измерение емкости с использованием матричного коммутатора на частоте более 1 МГц вполне допустимо, но необходимо подчеркнуть, что 5 МГц – это жесткий верхний предел частоты. Чтобы добиться удовлетворительных результатов измерения емкости на частоте более 5 МГц следует использовать прямые соединения.

## Измерения емкости при высоковольтном смещении постоянного тока

В главе 4 мы обсуждали проведение высоковольтных и сильноточных измерений. Однако мы еще не имели достаточной подготовки по теории измерения емкости, чтобы обсуждать особенности измерения емкости при высоковольтном смещении постоянного тока. Основой проведения этих измерений является обеспечение высоковольтного смещения по Т-образной схеме.

### Высоковольтное смещение по Т-образной схеме

Высоковольтное смещение по Т-образной схеме используется при работе с модулем многочастотного измерения емкости (MFCMU) и высоковольтным модулем «источник/измеритель» (HVSMU). Упрощенная схема подачи высоковольтного смещения по Т-образной схеме показана ниже.

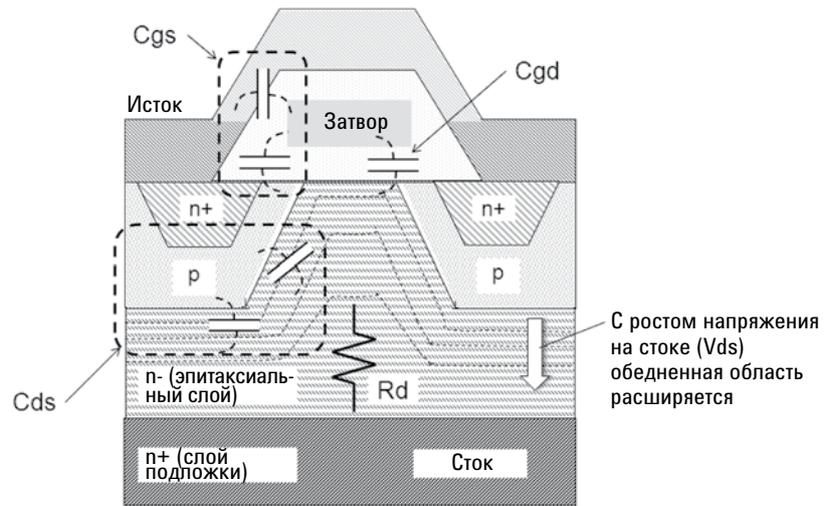


**Рис. 8.53.** С помощью высоковольтного смещения по Т-образной схеме выходы MFCMU и HVSMU преобразуются в знакомые по методу 4TP выходы CML и CMH

Выходы CMH и CML устройства подачи высоковольтного смещения по Т-образной схеме N1260A (версия для зондовой станции) представляют собой разъемы типа SHV. Обратите внимание, что предусмотрен вывод линии guard-экрана MFCMU по переменному току (в определенных ситуациях при измерениях его необходимо подключить к одному из выводов ИУ). Однако чтобы понять, как использовать guard-экран по переменному току, сначала необходимо повторить основы измерения емкости мощных МОП-транзисторов.

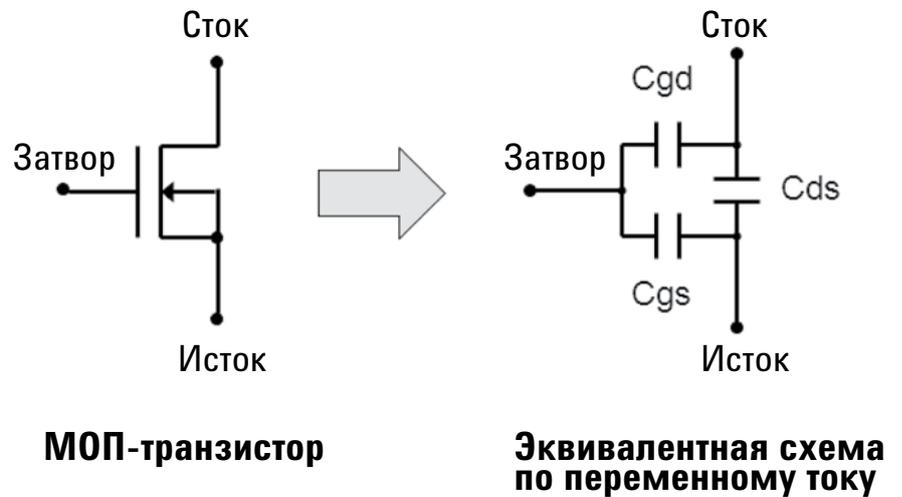
*Измерение емкости мощных МОП-транзисторов*

Ниже схематически показана структура мощного n-канального МОП-транзистора.



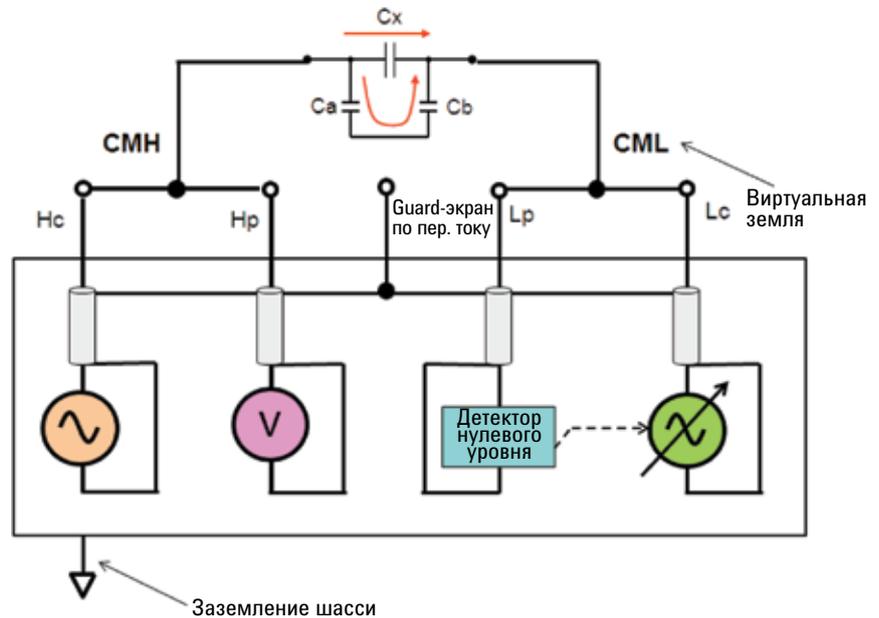
**Рис. 8.54.** На схеме мощного n-канального МОП-транзистора показаны емкости и обедненные области

К стоку мощных МОП-транзисторов прикладывается очень высокое напряжение смещения, при этом обе емкости сток-исток ( $C_{ds}$ ) и затвор-исток ( $C_{gs}$ ) зависят от значения напряжения постоянного тока, приложенного к стоку. Ниже показана модель МОП-транзистора для переменного тока.



**Рис. 8.55.** Модель мощного МОП-транзистора для переменного тока

А теперь рассмотрим, что происходит, когда нужно измерить одну из этих трех емкостей с помощью измерителя емкости. На следующем рисунке показана ситуация, когда мы пытаемся измерить неизвестную емкость ( $C_x$ ) трехполюсника без использования guard-экрана по переменному току (т.е. неиспользуемый вывод не связан с землей).

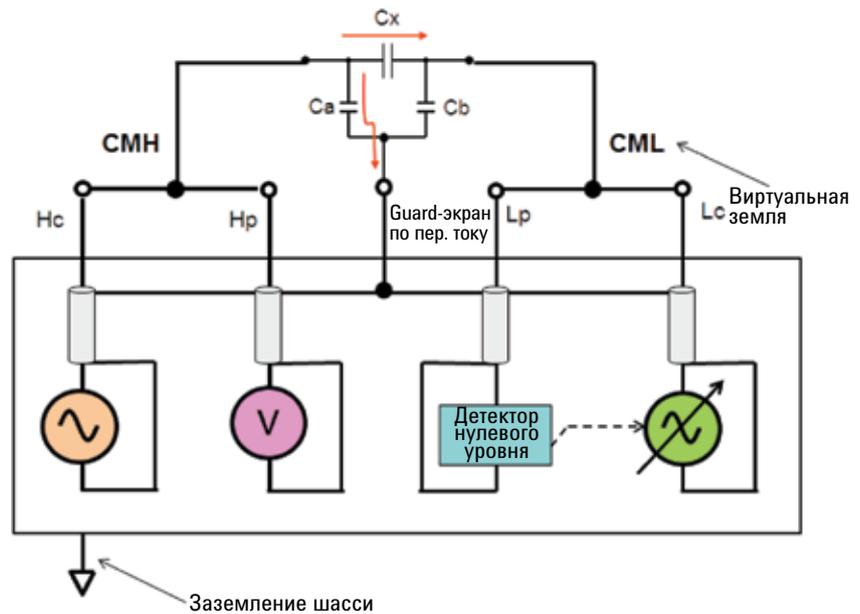


**Рис. 8.56.** Измерение емкости трехполюсника без использования guard-экрана по переменному току

Из рисунка видно, что когда неиспользуемый вывод не связан с землей, ток может протекать через две других емкости и в результате возникает ошибка измерений. Лучший способ избежать этого – обеспечить альтернативный путь току, чтобы ток, протекающий через  $C_a$ , не возвращался через  $C_b$  в узел  $CML$ . Добиться этого можно путем подключения неиспользованного вывода по переменному току к guard-экрану измерителя емкости.

**Примечание.** Перед тем, как сделать это, важно понять, что guard-экран по переменному току объединен со схемой автобалансирующегося моста, и что он подключен к shield-экранам парных разъемов с четырьмя выводами. Линия guard-экрана по переменному току – это не то же самое, что линия заземления, вывод которой подключен к заземлению шасси.

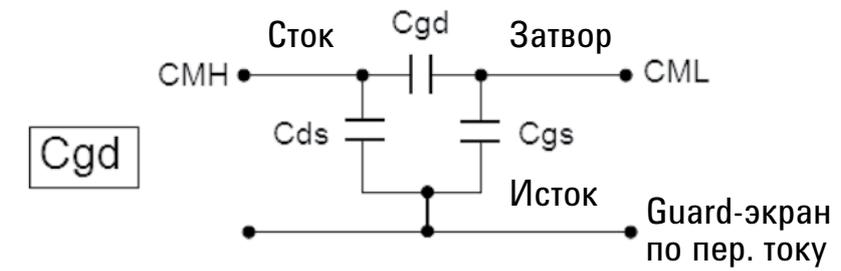
Следующий рисунок демонстрирует преимущество подсоединения guard-экрана по переменному току к неиспользуемому выводу.



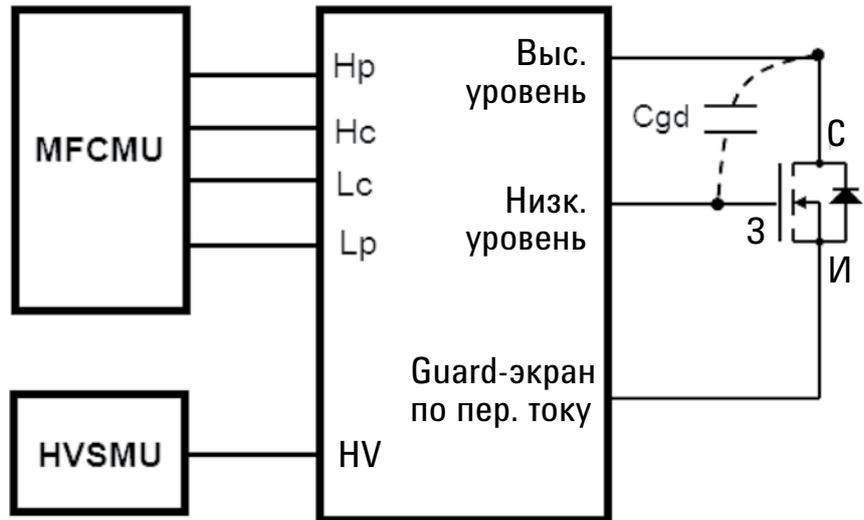
**Рис. 8.5.** Измерение емкости трехполюсника с использованием guard-экрана по переменному току.

Когда guard-экран по переменному току подключен к третьему выводу, ток, протекающий через паразитный тракт ( $C_a$ ), не влияет на точность измерения неизвестной емкости ( $C_x$ ), поскольку емкость измеряется через узел CML. Конечно, эта схема предполагает, что импеданс узла guard-экрана по переменному току гораздо меньше, чем импеданс паразитного тракта ( $C_b$ ). Здесь мы не будем обсуждать применение модуля HVSMU и высоковольтного смещения по T-образной схеме. Их подключение мы объясним позже, когда будем по отдельности рассматривать процесс измерения каждой емкости.

На следующем рисунке показан правильный способ измерения  $C_{gd}$  с помощью высоковольтного смещения по Т-образной схеме.

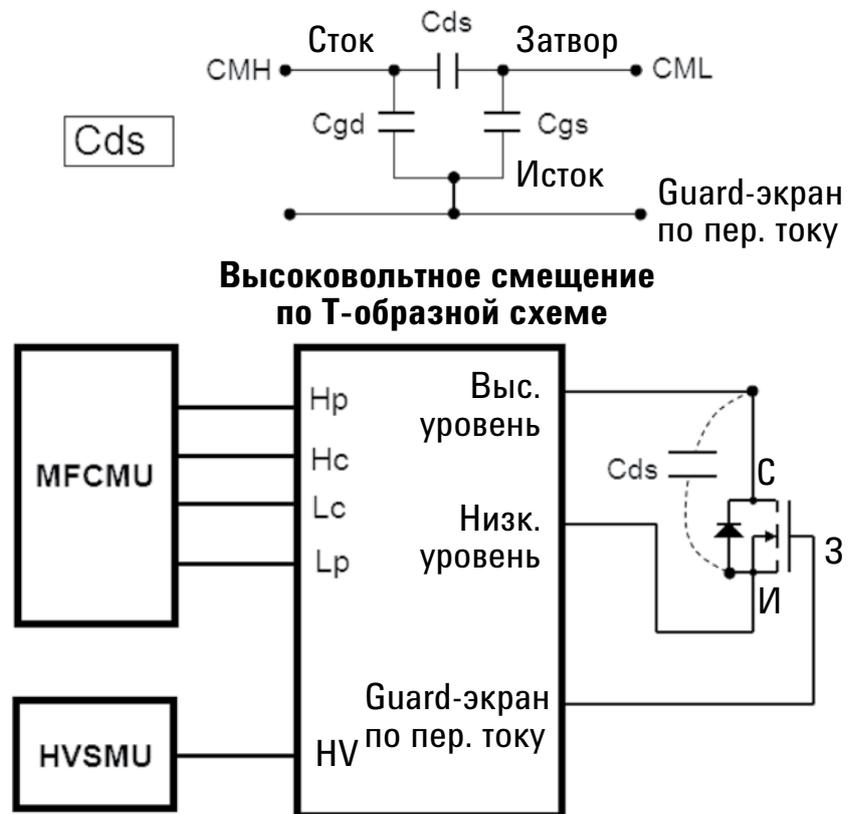


**Высоковольтное смещение по Т-образной схеме**



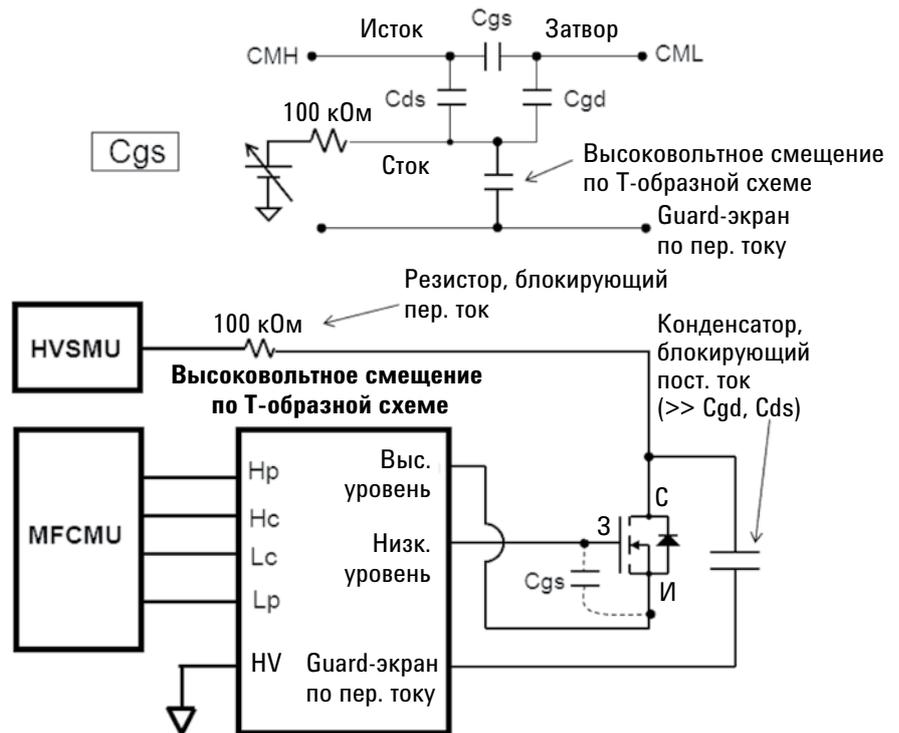
**Рис. 8.58.** Измерение емкости затвор-сток ( $C_{gd}$ ) МОП-транзистора с помощью высоковольтного смещения по Т-образной схеме и *guard*-экрана по переменному току

Видно, что измерение  $C_{gd}$  с высоковольтным смещением по Т-образной схеме не вызывает сложностей. Измерение  $C_{ds}$  с помощью высоковольтного смещения по Т-образной схеме тоже выполняется очень просто, как показано на следующем рисунке.



**Рис. 8.59.** Измерение емкости сток-исток ( $C_{ds}$ ) МОП-транзистора с помощью высоковольтного смещения по Т-образной схеме и *guard*-экрана по переменному току

Измерение емкости затвор-исток ( $C_{gs}$ ) имеет ряд сложностей, которые отсутствуют при двух других измерениях. Кроме того, что мы должны замкнуть линию guard-экрана по переменному току на сток, на сток также необходимо подать высоковольтное смещение. Решение заключается в том, чтобы соединить сток и линию guard-экрана по переменному току через конденсатор большой емкости (много больше, чем  $C_{gd}$  или  $C_{ds}$ ) так, чтобы импеданс между стоком и линией guard-экрана по переменному току оказался гораздо меньше импеданса относительно истока или затвора. И наоборот, мы должны соединить HVSMU со стоком через достаточно большое сопротивление, чтобы не допустить проникновения на HVSMU сигнала переменного тока от MFCMU. На следующем рисунке показано, как правильно выполнить это измерение.



**Рис. 8.60.** Измерение емкости затвор-исток ( $C_{gs}$ ) МОП-транзистора с помощью высоковольтного смещения по Т-образной схеме и guard-экрана по переменному току

**Примечание.** Хотя в этом случае высоковольтное смещение по Т-образной схеме не требуется (фактически оно байпасируется), соединения показаны с учетом предположения, что оно используется. Это связано с тем, что при измерении  $C_{gd}$  и  $C_{gs}$  высоковольтное смещение по Т-образной схеме необходимо, поэтому предполагается, что пользователь его уже установил.

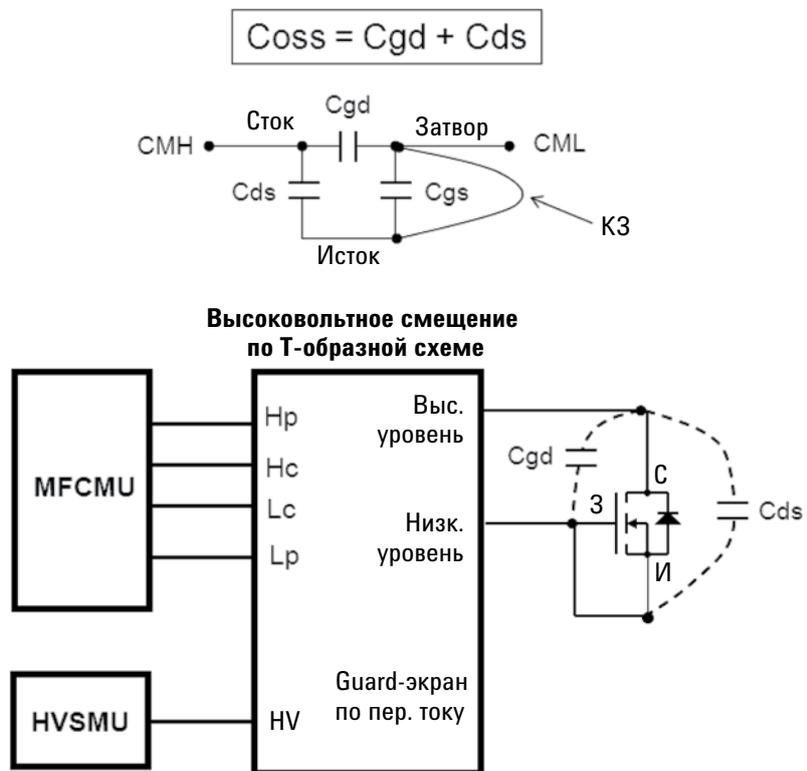
В технических описаниях МОП-транзисторов указываются различные значения их емкости. Обычно в качестве типовых параметров указаны выходная емкость ( $C_{oss}$ ), входная емкость ( $C_{iss}$ ) и емкость обратной связи ( $C_{rss}$ ). Эти параметры можно вычислить из величин  $C_{ds}$ ,  $C_{gs}$  и  $C_{gd}$ :

$$C_{oss} = C_{gd} + C_{ds} \quad (\text{Уравнение 8.15})$$

$$C_{iss} = C_{gs} + C_{gd} \quad (\text{Уравнение 8.16})$$

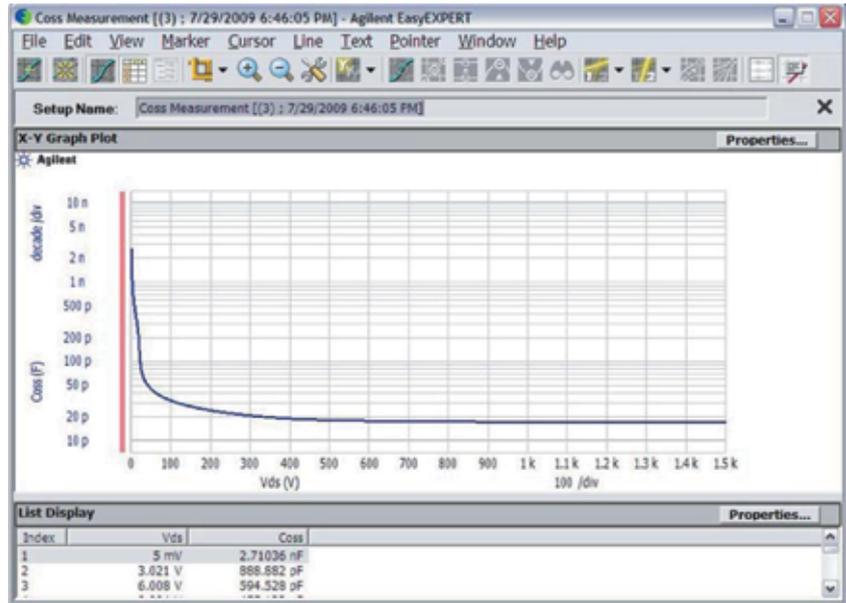
$$C_{rss} = C_{gd} \quad (\text{Уравнение 8.17})$$

Ранее мы уже говорили о том, как измерить  $C_{rss}$  ( $C_{gd}$ ). Емкости  $C_{iss}$  и  $C_{oss}$  также можно измерить непосредственно с помощью В1505А, HVSMU, MFCMU и высоковольтного смещения по Т-образной схеме, хотя подсоединения в этом случае осуществляются иначе, чем при измерении  $C_{ds}$ ,  $C_{gs}$  и  $C_{gd}$ . Вначале обсудим измерение  $C_{oss}$ , поскольку оно проще. Для измерения  $C_{oss}$  следует просто закоротить выводы затвора и истока, как показано на следующем рисунке.



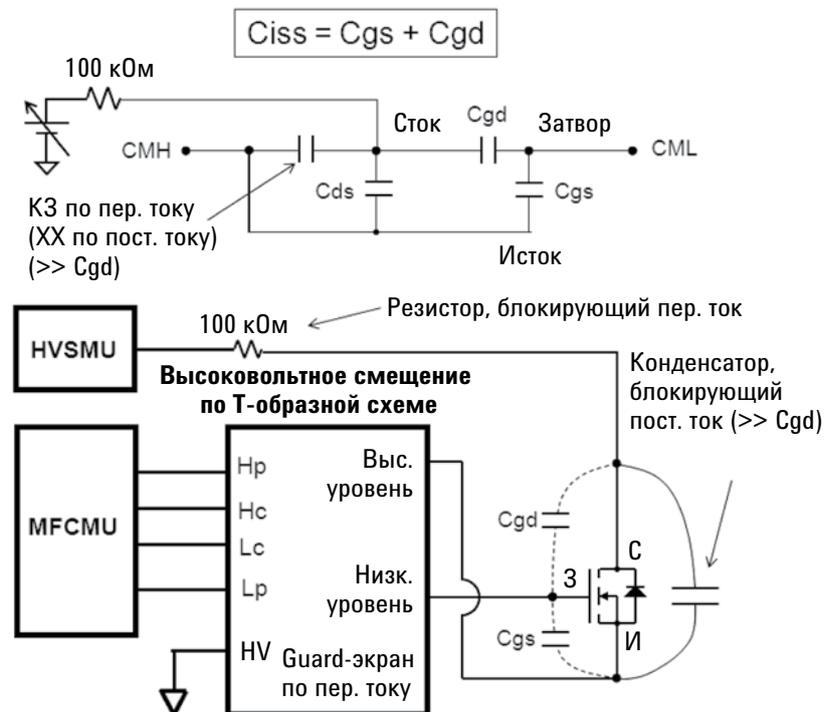
**Рис. 8.61.** Измерение  $C_{oss}$  с помощью В1505А, HVSMU, MFCMU и высоковольтного смещения по Т-образной схеме

Обратите внимание, что при проведении этого измерения нам не нужно использовать guard-экран по переменному току, поскольку мы хотим измерить ток, протекающий через обе емкости  $C_{gd}$  и  $C_{ds}$ . На следующем графике показан результат прямого измерения емкости  $C_{oss}$  МОП-транзисторов высокой мощности с помощью анализатора В1505А.



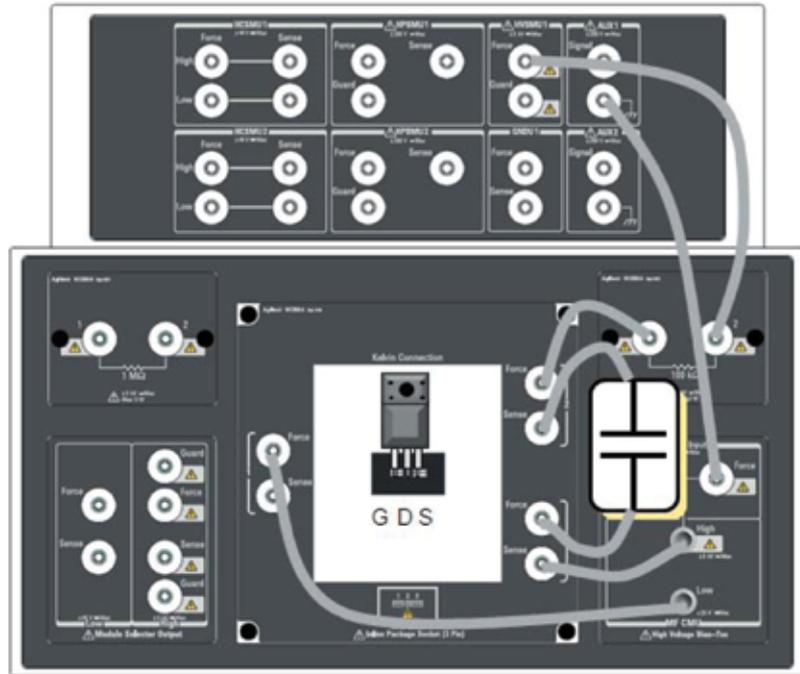
**Рис. 8.62.** Выходная емкость ( $C_{oss}$ ), измеренная при напряжении смещения 1500 В пост. тока

Измерение  $C_{iss}$  является более сложным, потому что нам понадобится подключить к стоку вывод СМН, а также подать на сток высокое напряжение. Решение, как и в случае измерения емкости  $C_{gs}$ , заключается в том, что нужно создать соединение по переменному току с выводом СМН модуля MFCMU, а также и соединение по постоянному току с HVSMU. Схема показана на следующем рисунке.



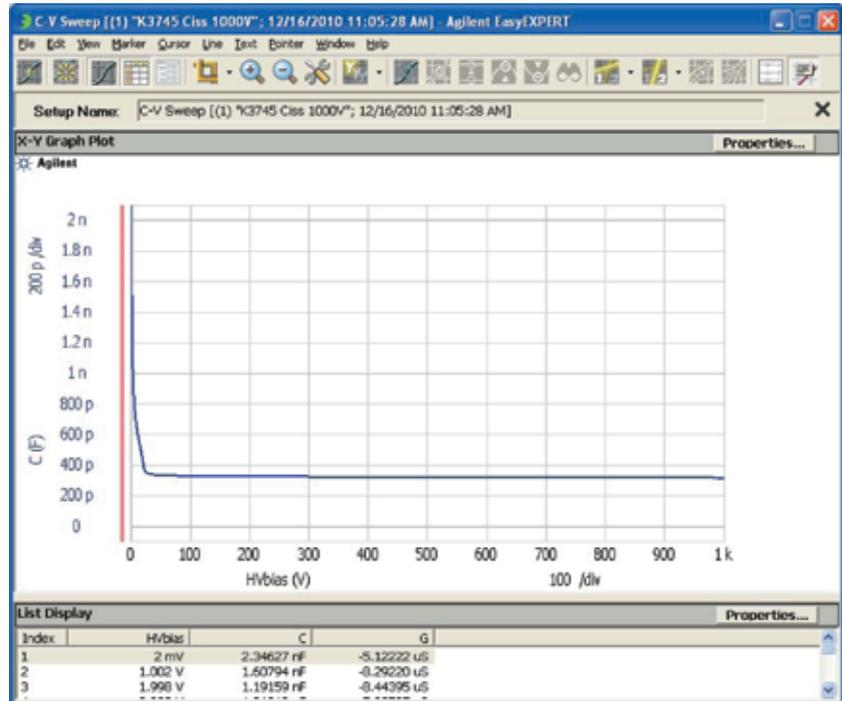
**Рис. 8.63.** Измерение  $C_{iss}$  с помощью B1505A, HVSMU, MFCMU и высоковольтного смещения по T-образной схеме

Между выводами СМН и стока размещают конденсатор большой емкости, чтобы емкость сток-исток ( $C_{ds}$ ) представляла собой КЗ для сигналов переменного тока. Емкость такого не пропускающего постоянный ток конденсатора должна быть намного больше, чем емкость затвор-сток ( $C_{gd}$ ), чтобы эффективный импеданс между выводами СМН и СМЛ представлял собой только параллельно соединенные емкости  $C_{gs}$  и  $C_{gd}$ . Как и в ранее рассмотренном случае измерения  $C_{gs}$ , модуль HVSMU должен быть подключен к узлу стока через относительно большой резистор, чтобы на него не влиял переменный ток при измерении емкости. На рисунке ниже показаны эти соединения при измерении параметров корпусного МОП-транзистора с помощью тестовой оснастки N1259A.



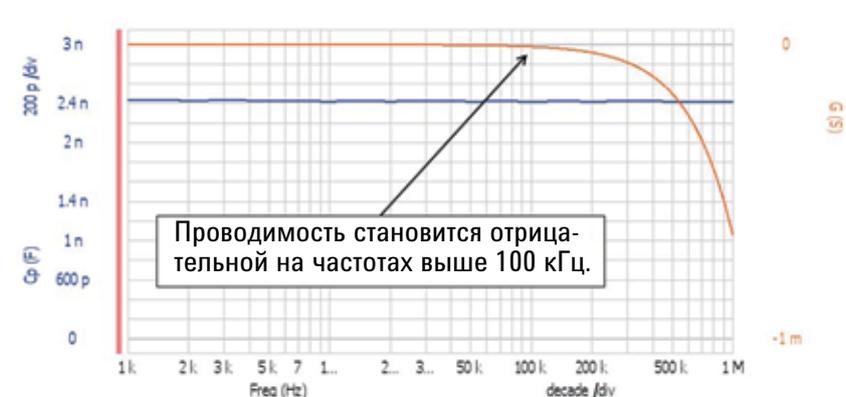
**Рис. 8.64.** Измерение  $C_{iss}$  МОП-транзистора с помощью тестовой оснастки N1259A

На следующем графике показаны результаты прямого измерения емкости  $C_{iss}$  МОП-транзистора высокой мощности с помощью анализатора V1505A.



**Рис. 8.65.** Входная емкость ( $C_{iss}$ ), измеренная при напряжении смещения 1000 В пост. тока

Как правило, при измерении емкости маломощных транзисторов компенсацию нагрузки следует проводить только при измерениях на частотах выше 5 МГц. Однако чтобы гарантировать точность измерения емкости транзисторов высокой мощности при использовании высоковольтного смещения по Т-образной схеме, компенсация нагрузки должна быть выполнена на гораздо более низких частотах. В большинстве технических описаний приводятся значения  $C_{oss}$ ,  $C_{iss}$  и  $C_{rss}$  на частоте 1 МГц. Ниже приведены результаты измерений емкости затвор-исток ( $C_{gs}$ ) и проводимости ( $C_p-G$ ) в виде графиков в зависимости от частоты. Измерения выполнялись с использованием высоковольтного смещения по Т-образной схеме после компенсации емкости с помощью калибровочных мер ХХ/КЗ. Обратите внимание, что измеренная проводимость становится отрицательной на частотах выше 100 кГц.



**Рис. 8.66.** Графики зависимостей  $C_p-G$  от частоты с использованием высоковольтного смещения по Т-образной схеме

Хотя этот эффект может быть устранен путем проведения компенсации емкости нагрузки, проведение такой компенсации для большинства устройств высокой мощности при использовании зондовой станции не очень практично. Поэтому, если компенсация нагрузки не может быть выполнена, то лучше всего измерять емкостные параметры МОП-транзисторов на частотах не более 100 кГц. В следующей таблице приведена относительная погрешность измерений Ср-Г для мощных МОП-транзисторов в зависимости от вида компенсации на частотах 100 кГц и 1 МГц (при использовании высоковольтного смещения по Т-образной схеме).

	100 кГц		1 МГц	
	Ср	Г	Ср	Г
XX	Небольшая ошибка (1%)	ОК	Большая ошибка	Большая ошибка
XX/КЗ	ОК	ОК	ОК	Большая ошибка
XX/КЗ/ Согласован- ная нагрузка	ОК	ОК	ОК	ОК

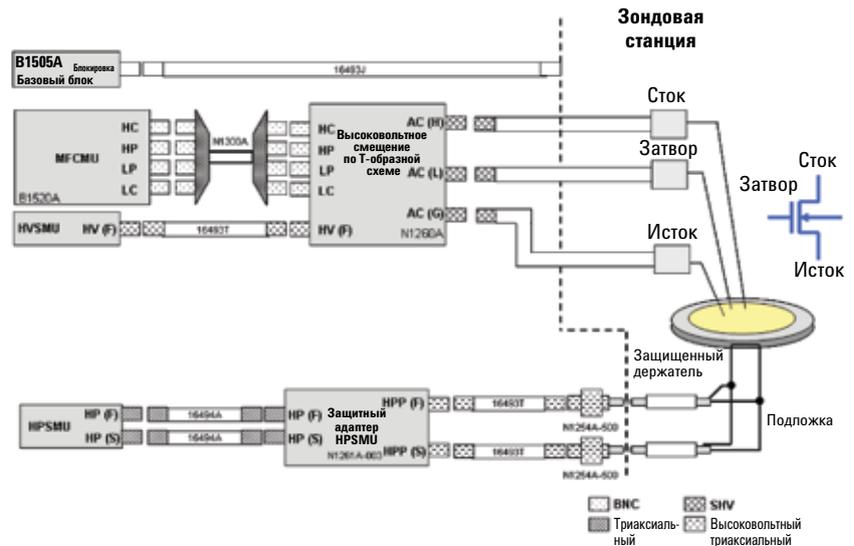
**Рис. 8.67.** Таблица сравнения относительной точности Ср-Г измерений на 100 кГц и 1 МГц для различных видов компенсации емкости при использовании высоковольтного смещения по Т-образной схеме

**Примечание.** Данные в таблице представлены для относительно больших значений емкости перехода (порядка нескольких нанофард), которые являются типичными для мощных МОП-транзисторов.

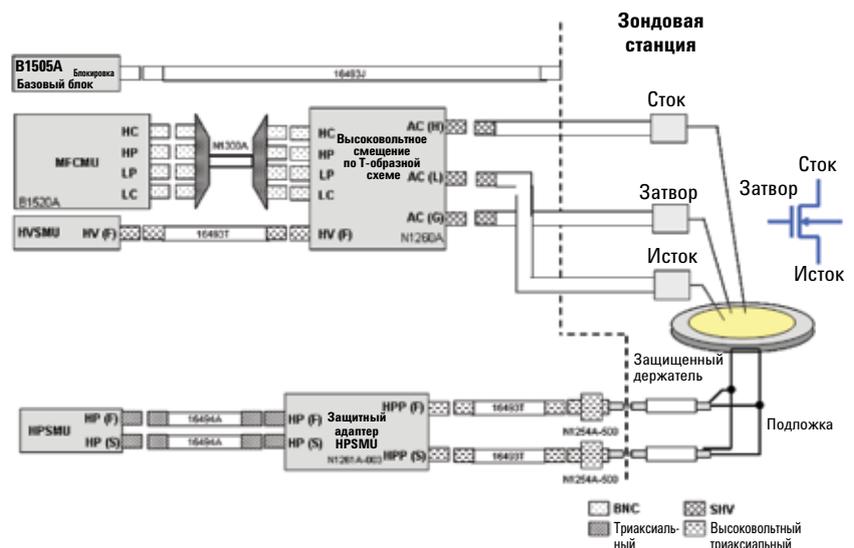
Используя описанные выше методы, можно непосредственно измерить емкость мощных МОП-транзисторов при напряжениях до 3000 В. Это является значительным шагом вперед по сравнению с традиционными измерениями этих параметров, в которых, как правило, используются самодельные тестовые установки, которые позволяют измерять характеристики устройства при воздействии ступенчатого напряжения и извлечения значения емкости из полученной постоянной времени RC.

*Подключение высоковольтного смещения постоянного тока к зондовой станции*

Имеется два типа полупроводниковых устройств, на которых выполняются измерения ВФХ с помощью зондовых станций: с поперечной и вертикальной структурой. Подключение к поперечным устройствам немного проще, поскольку для подачи смещения на держатель пластины можно использовать модуль HPSMU (подключение к подложке). Наиболее распространенными являются измерения емкости сток-исток ( $C_{ds}$ ) и затвор-сток ( $C_{gd}$ ). Для проведения этих измерений используются одинаковые кабели и разъемы; нужно только вручную изменить подключения в соответствии с представленными ниже рисунками. Следующие два рисунка иллюстрируют подключения к устройствам с поперечной структурой.

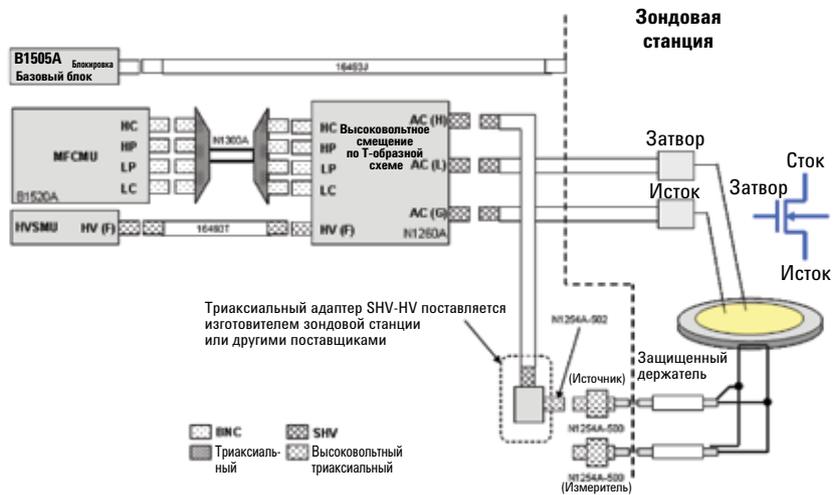


**Рис. 8.68.** Конфигурация анализатора B1505A при измерении емкости затвор-сток ( $C_{gd}$ ) с подачей высоковольтного смещения постоянного тока на устройстве с поперечной структурой

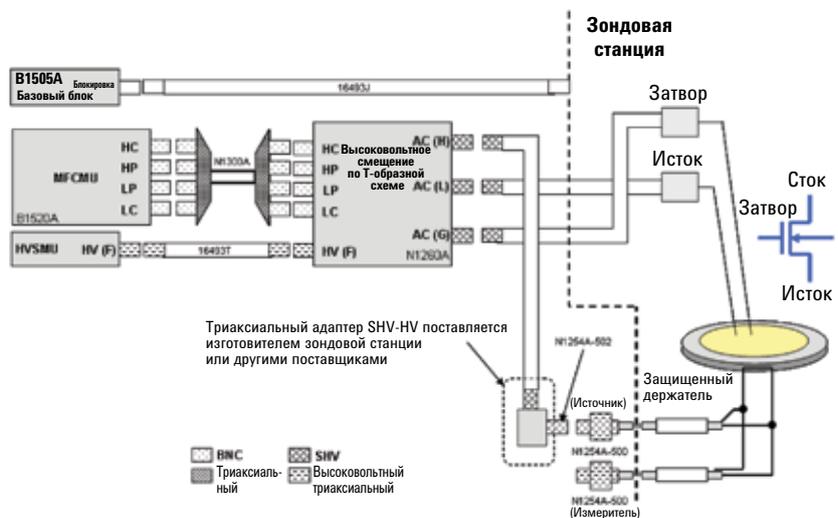


**Рис. 8.69.** Конфигурация анализатора B1505A при измерении емкости сток-исток ( $C_{ds}$ ) с подачей высоковольтного смещения постоянного тока на устройстве с поперечной структурой

Для устройства с вертикальной структурой нужно подать высокое напряжение на держатель пластины. Для этого вам понадобится адаптер SHV/высоковольтный триаксиальный кабель. Такой адаптер должен быть предоставлен либо поставщиком вашей зондовой станции, либо сторонним производителем адаптеров этого типа. Как и в случае устройства с поперечной структурой, кабели и разъемы одинаковы для обоих измерений (Cgd и Cds), но подключения должны быть изменены вручную, как показано на двух рисунках ниже.



**Рис. 8.70.** Конфигурация анализатора B1505A при измерении емкости затвор-сток (Cgd) с подачей высоковольтного смещения постоянного тока на устройстве с вертикальной структурой



**Рис. 8.71.** Конфигурация анализатора B1505A при измерении емкости сток-исток (Cds) с подачей высоковольтного смещения постоянного тока на устройстве с вертикальной структурой

Как вы могли убедиться, при конфигурировании зондовой станции важно учитывать, на каких именно типах приборов вы будете проводить измерения емкости с подачей высоковольтного смещения постоянного тока.

## Приложение А: решения компании Agilent Technologies для параметрических измерений

Компания Agilent Technologies предлагает различные приборы для параметрических измерений. Здесь будет показана только часть основных измерительных возможностей. Дополнительную информацию можно найти в техническом описании или на соответствующей веб-странице.

### Параметрические анализаторы полупроводников и приборов на их основе

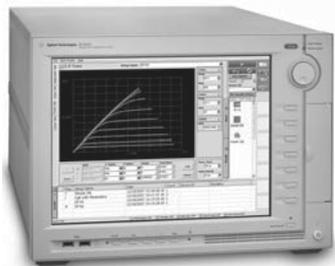
#### *Agilent B1500A – параметрический анализатор полупроводниковых приборов*



- Модульное исполнение: 10 гнезд
- Программная платформа на основе Windows с ПО EasyEXPERT
- Более 230 встроенных тестовых приложений
- Разрешение при измерении тока: 0,1 фА
- Разрешение при измерении напряжения: 0,5 мкВ
- Доступен модуль HPSMU  $\pm 200$  В и  $\pm 1$  А
- Диапазон частот емкостного модуля от 1 кГц до 5 МГц
- Доступен модуль PGU  $\pm 40$  В (с возможностями генератора линейных сигналов произвольной формы)
- Модуль «генератор сигналов/быстродействующий измеритель» (с возможностями генератора линейных сигналов произвольной формы) поддерживает быстрые и импульсные измерения ВАХ с частотой выборки 5 нс

### Анализаторы мощных полупроводниковых приборов/характериографы

#### *Agilent B1505A – анализатор мощных полупроводниковых приборов/характериограф*

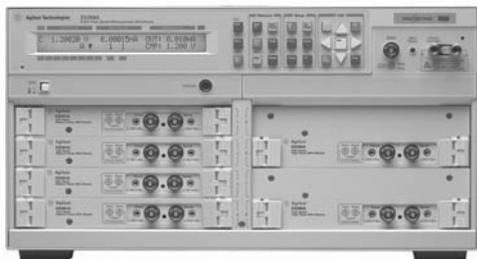


- Модульное исполнение: 10 гнезд
- Программная платформа на основе Windows с ПО EasyEXPERT
- Режим характериографа с управлением свипированием с помощью поворотной ручки
- Разрешение при измерении тока: 10 фА
- Разрешение при измерении напряжения: 0,2 мкВ
- Доступен сильноточный модуль SMU  $\pm 20$  А
- Доступен высоковольтный модуль SMU  $\pm 3000$  В
- Емкостной модуль работает в диапазоне частот от 1 кГц до 5 МГц и поддерживает измерения ВФХ при смещении 3000 В постоянного тока

## Модульные источники/измерители

---

### *Agilent E5260A – базовый блок для высокоскоростных измерений, с 8 гнездами*



- Модульное исполнение: 8 гнезд
- Базовый интерфейс пользователя для точечных измерений и отладки программ
- Кодовая совместимость с 4142B
- Измерения с помощью SMU в несколько раз быстрее, чем у 4142B
- Выходной ток до 4 А при одновременном использовании 4-х HPSMU
- 8 программируемых входных/выходных линий запуска в дополнение к входам/выходам и выходам запуска с разъемами BNC
- Модуль заземления 4 А

---

### *Agilent E5262A – двухканальный источник/измеритель (средней мощности)*



- Базовая конфигурация: 2 x MPSMU
- Базовый интерфейс пользователя для точечных измерений и отладки программ
- Кодовая совместимость с 4142B
- Измерения с помощью SMU в несколько раз быстрее, чем у 4142B
- 8 программируемых входных/выходных линий запуска в дополнение к входам/выходам и выходам запуска с разъемами BNC
- Модуль заземления 2,2 А

---

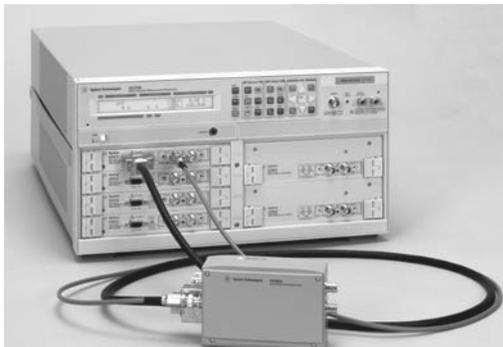
### *Agilent E5263A – двухканальный источник/измеритель (средней и высокой мощности)*



- Базовая конфигурация: 1 x MPSMU, 1 x HPSMU
- Базовый интерфейс пользователя для точечных измерений и отладки программ
- Кодовая совместимость с 4142B
- Измерения с помощью SMU выполняются в несколько раз быстрее, чем 4142B
- 8 программируемых входных/выходных линий запуска в дополнение к входам/выходам и выходам запуска с разъемами BNC
- Модуль заземления 2,2 А

---

### *Agilent E5270B – базовый блок для высокоскоростных измерений, с 8 гнездами*



- Модульное исполнение: 8 гнезд
- Базовый интерфейс пользователя для точечных измерений и отладки программ
- Кодовая совместимость с 4142B
- Поддержка HRSMU с разрешением 1 фА и 0,5 мкВ
- HRSMU поддерживает ASU для разрешения 0,1 фА
- Выходной ток до 4 А при одновременном использовании 4-х HPSMU
- 8 программируемых входных/выходных линий запуска в дополнение к входам/выходам и выходам запуска с разъемами BNC
- Модуль заземления 4,0 А
- Для пересылки алгоритмов в 4070 или 4080 поддерживаются команды TIS для языков Basic и C

## Настольные источники/измерители

*Agilent B2901A – прецизионный параметрический анализатор, 100 фА, 1 канал*

*Agilent B2902A – прецизионный параметрический анализатор, 100 фА, 2 канала*



- Приборы с одно- и двухканальным SMU
- ЖК дисплей 4,3" с графическим интерфейсом пользователя
- Диапазон измерений/настроек:  $\pm 210$  В,  $\pm 3$  А (пост.),  $\pm 10,5$  А (имп.)
- Регулируемое разрешение: 1 пА и 1 мкВ
- Разрешение при измерении: 100 фА и 100 нВ
- Поддержка 4-проводных измерений
- USB порт для сохранения данных, графиков и настроек на флеш-накопитель
- Поддерживает управления через веб-браузер (полностью соответствует спецификациям LXI класса C)
- Полное управление с ПК через порты GPIB, LAN или USB

*Agilent B2911A – прецизионный параметрический анализатор, 10 фА, 1 канал*

*Agilent B2912A – прецизионный параметрический анализатор, 10 фА, 2 канала*



- Приборы с одно- и двухканальным SMU
- ЖК дисплей 4,3" с графическим интерфейсом пользователя
- Диапазон измерений/настроек:  $\pm 210$  В,  $\pm 3$  А (пост. тока),  $\pm 10,5$  А (имп.)
- Регулируемое разрешение: 10 фА и 100 нВ
- Разрешение при измерении: 10 фА и 100 нВ
- Поддержка 4-проводных измерений
- USB порт для сохранения данных, графиков и настроек на флеш-накопитель
- Поддерживает управления через веб-браузер (полностью соответствует спецификациям LXI класса C)
- Полное управление с ПК через порты GPIB, LAN или USB

## Матричные коммутаторы

---

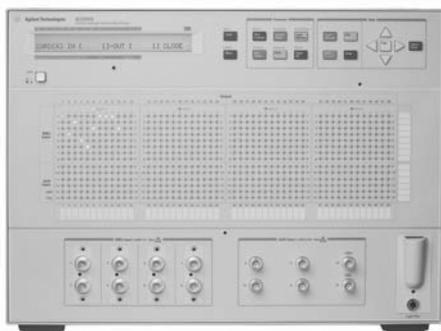
### *Agilent E5250A – коммутатор с малым током утечки*



- 6 триаксиальных входов
- 4 коаксиальных входа
- 6 внутренних трактов
- 2 слаботочных тракта
- Максимальное количество выходных портов: 48
- Эффективное разрешение по току: 20 фА
- Полоса пропускания: 10 МГц

---

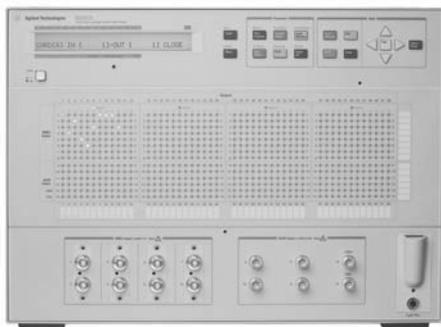
### *Agilent B2200A – коммутатор с фемтоамперным током утечки*



- 8 триаксиальных входов
- 6 коаксиальных входа
- 14 внутренних трактов
- 8 слаботочных трактов
- Максимальное количество выходных портов: 8
- Эффективное разрешение по току: 1 фА
- Полоса пропускания: 30 МГц

---

### *Agilent B2201A – 14-канальный коммутатор с малым током утечки*



- 8 триаксиальных входов
- 6 коаксиальных входа
- 14 внутренних трактов
- 8 слаботочных трактов
- Максимальное количество выходных портов: 48
- Эффективное разрешение по току: 10 фА
- Полоса пропускания: 30 МГц

## Анализаторы импеданса

---

### *Agilent 4294A – прецизионный анализатор импеданса*



- Диапазон частот: от 40 Гц до 110 МГц
- Диапазон напряжения тестовых сигналов: от 5 мВ до 1 В (ср.кв.)
- Диапазон тока тестовых сигналов: от 200 мкА до 20 мА (ср.кв.)
- Диапазон смещения по напряжению постоянного тока: от 0 В до  $\pm 40$  В
- Диапазон смещения по постоянному току: от 0 мА до  $\pm 100$  мА

## Приложение В: решения компании Agilent Technologies для измерений емкости на пластине

Agilent Technologies может предоставить интегрированный пакет решений для измерения емкости, от снятия квазистатической ВФХ до измерения высокочастотной ВФХ (110 МГц). Во всех случаях программное обеспечение Agilent EasyEXPERT обеспечивает простой в использовании пользовательский интерфейс, упрощающий процесс измерения емкости и облегчающий экспорт данных в рабочую среду на ПК для дальнейшего анализа и отчетности. Обзор этих решений для низких значений напряжения смещения постоянного тока (100 В или меньше) представлен ниже.

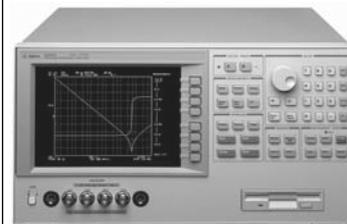
*Параметрический анализатор полупроводниковых приборов Agilent B1500A*



QSCV (SMU)

От 1 кГц до 5 МГц  
(MFCMU)

*Прецизионный анализатор импеданса Agilent 4294A*



До 110 МГц

Программное обеспечение Agilent EasyEXPERT

Кроме того, анализатор мощных полупроводниковых приборов/характериограф Agilent B1505A может измерять емкость с подачей смещения до 3000 В постоянного тока.

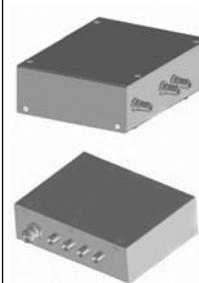
*Анализатор мощных полупроводниковых приборов/характериограф Agilent B1505A*



От 1 кГц до 5 МГц при смещении до 3000 В постоянного тока

Программное обеспечение Agilent EasyEXPERT

*Высоковольтное смещение по T-образной схеме Agilent N1260A*



## Приложение С: список рекомендаций по применению

Ниже приведен список рекомендаций по применению от Agilent Technologies, связанных с параметрическим тестированием.

Рекомендации по применению	Наименование	Номер документа
PN 4156-1	Отличия нового параметрического анализатора полупроводниковых приборов Agilent 4155B/4156B от Agilent 4155A/4156A	5965-9846E
PN 4156-2	Новый параметрический анализатор полупроводниковых приборов Agilent 4155B/4156B – конфигурирование NFS и сервера печати для работы в сети.	5966-4184E
PN 4156-3	Параметрический анализатор полупроводников Agilent 4155B/4156B – руководство по подсоединению зондовых станций	5966-4185E
PN 4156-4	Преимущества параметрического анализатора полупроводниковых приборов Agilent 4155B/4156B над Agilent 4155A/4156A	5968-6681E
AN 4156-1	Измерение сверхнизких постоянных токов МОП-транзисторов на уровне пластин	5963-2014E
AN 4156-2	Автоматизированное извлечение параметров полупроводников с помощью Agilent 4155C/4156C	5963-1249E
AN 4156-3	Оценка деградации МОП-приборов за счет горячих носителей заряда	5963-1111E
AN 4156-4	Оценка ячеек флеш-памяти	5965-5657E
AN 4156-5	Измерение параметров силовых устройств с помощью внешнего источника питания постоянного тока	5963-2365E
AN 4156-6	Оптимизация входного обследования полупроводниковых устройств	5963-2364E
AN 4156-7	Оценка электромиграции с помощью процедуры SWEAT	5963-1110E
AN 4156-8	Оценка надежности оксидов с помощью тестирования V-Ramp и J-Ramp	5963-1248E
AN 4156-9	Оценка поверхностного состояния с помощью методов перекачки зарядов	5964-2195E
AN 4156-10	Оценка параметров подзатворных оксидов с помощью квазистатического метода измерения ВФХ на основе ступенчатого напряжения	5988-1025EN
AN 4156-11	Прецизионные измерения ширины металлической сигнальной линии внутренних соединений ИС менее 250 нм	5988-2695EN
AN E5250A-1	Измерение слабых токов с помощью базового блока матричного коммутатора Agilent E5250A	5964-9112E
AN E5250A-2	Оценка деградации МОП-транзисторов за счет горячих носителей	5964-9113E
AN E5250A-3	Точные и эффективные измерения ВФХ	5965-5658E
AN B1500A-1	Измерение параметров углеродных нанотрубок в полевых и одноэлектронных транзисторах с помощью анализатора Agilent B1500A	5989-2842EN
AN B1500A-2	Переход с Agilent 4155C и 4156C на Agilent B1500A	5989-2851EN
AN B1500A-3	Измерения ВАХ и ВФХ с помощью модулей MFCMU и SCUU анализатора Agilent B1500A	5989-3608EN
AN B1500A-4	Заказные прикладные тесты для ПО Agilent B1500A EasyEXPERT	5989-5167EN
AN B1500A-5	Создание последовательности тестирования с помощью ПО Agilent B1500A EasyEXPERT	5989-5524EN
AN B1500A-6	Точное измерение температурной нестабильности при отрицательном смещении (NBTI) с помощью режима выборки Timing-on-the-fly	5989-5711EN
AN B1500A-7	Использование анализатора Agilent B1500A с зондовыми станциями нанодиапазона при анализе отказов	5989-5927EN

Рекомендации по применению	Наименование	Номер документа
AN B1500A-8	Многоканальное параллельное измерение температурной нестабильности при отрицательном смещении (NBTI) в режиме выборки Timing-on-the-fly анализатора Agilent B1500A	5989-6526EN
AN B1500A-9	Усовершенствованное измерение параметров ячеек флеш-памяти с помощью анализатора Agilent B1500A	5989-8654EN
AN B1500A-10	Сверхбыстрое (1 мс) измерение температурной нестабильности при отрицательном смещении (NBTI) с помощью модуля WGFMU анализатора Agilent B1500A	5989-9963EN
AN B1500A-11	Измерение параметров случайных шумов в КМОП датчиках изображения	5990-3705EN
AN B1500A-12	Миллисекундные измерения ВАХ ячеек флеш-памяти с помощью Agilent B1530A	5990-3636EN
AN B1500A-13	Измерение импульсных/переходных электрических свойств органических тонкопленочных транзисторов (OTFT)	5990-3983EN
AN B1500A-14	Измерение ВАХ и ВФХ солнечных/фотогальванических ячеек с помощью анализатора Agilent B1500A	5990-4428EN
AN B1500A-15	Измерение сверхмалых постоянных токов МОП-транзисторов на уровне пластин	5990-5547EN
AN B1500A-16	Анализатор B1500A: комплексное решение для измерения электрических параметров КМОП приборов	5990-5566EN
AN B1500A-17	Комплексное решение для тестирования надежности КМОП приборов	5990-5896EN
SE B1500A-1	Руководство Agilent по выбору решения для импульсного параметрического тестирования ВАХ	5990-3672EN
AN B1505A-1	Точное и эффективное измерение параметров мощных п/п приборов при 3000 В/20 А	5990-3749EN
AN B1505A-2	Режим характеристики обеспечивает простой и удобный анализ отказов	5990-3813EN
AN B1505A-3	Прецизионная оценка параметров мощных п/п приборов при 40 А	5990-5432EN
AN B1505A-4	Прямое измерение емкости мощных МОП-транзисторов при 3000 В	5990-7145EN
PN B1505A-1	Создание специализированных гнездовых модулей для мощных корпусных п/п приборов	5990-46654EN
AN 4294-3	Решение Agilent для оценки ВФХ конденсатора подзатворного оксида МОП приборов с помощью Agilent 4294A	5988-5102EN
AN 1369-3	Методика Agilent для точных измерений с помощью зондовой системы Cascade Microtech	5988-3279EN
AN B2900-1	Оценка диодов с помощью анализаторов Agilent серии B2900A	5990-5671EN
AN B2900-2	Измерение сопротивлений с помощью анализаторов Agilent серии B2900A	5990-6633EN
AN B2900-3	Измерение параметров полевых транзисторов с помощью анализаторов Agilent серии B2900A	5990-6587EN
AN B2900-4	Тестирование диодов с помощью анализаторов Agilent серии B2900A	5990-6993EN
AN B2900-5	Измерение ВАХ фотогальванических элементов с помощью анализаторов Agilent серии B2900A	5990-6660EN
AN B2900-6	Быстрые измерения $f_T$ -Ic с помощью анализаторов Agilent серии B2900A	5990-6895EN
AN B2900-7	Измерение ВАХ органических светодиодов с помощью анализаторов Agilent серии B2900A	5990-6994EN
AN B2900-8	Оценка термисторов с помощью анализаторов Agilent серии B2900A	5990-7118EN
AN B2900-9	Измерение параметров биполярных транзисторов с помощью анализаторов Agilent серии B2900A	5990-6995EN
AN B2900-10	Тестирование термисторов с помощью анализаторов Agilent серии B2900A	5990-7117EN

<b>Рекомендации по применению</b>	<b>Наименование</b>	<b>Номер документа</b>
AN B2900-11	Измерение ВАХ светодиодов с помощью анализаторов Agilent серии B2900A	5990-6559EN
AN B2900-12	Оценка варисторов с помощью анализаторов Agilent серии B2900A	5990-7116EN
AN B2900-13	Измерение световых ВАХ (LIV) лазерных диодов с помощью анализаторов Agilent серии B2900A	5990-7115EN
AN B2900-14	Тестирование варисторов с помощью анализаторов Agilent серии B2900A	5990-7114EN
AN B2900-15	Тестирование резисторов с помощью анализаторов Agilent серии B2900A	5990-7141EN
AN B2900-16	Тестирование светодиодов с помощью анализаторов Agilent серии B2900A	5990-7140EN

**ALWG** – аббревиатура Arbitrary Linear Waveform Generation (линейная генерация сигнала произвольной формы). ALWG – это способ генерации сигналов, при котором сигнал синтезируется с помощью заданного пользователем набора сегментов линии.

**ASU – Модуль коммутации с атто-чувствительностью.** Специализированный модуль для совместной работы с SMU высокого разрешения, позволяющий измерять токи с разрешением до 0,1 фА. ASU также выполняет некоторые коммутационные функции, позволяющие ему переключаться между своим SMU и другими устройствами, подсоединенными к нему через триаксиальные кабели.

**BNC кабель** – см. «коаксиальный кабель».

**CMU** – аббревиатура Capacitance Measurement Unit (модуль измерения емкости). Это очень общий термин, охватывающий любые виды аппаратного обеспечения, которые могут выполнять измерения емкости. Это может означать и настольный прибор, например, E4980A или 4294A, и такие подключаемые модули, как MFCMU прибора B1500A.

**GNDU – Модуль заземления.** Это SMU особого типа, который не имеет измерительных функций и всегда поддерживает напряжение ноль вольт.

**GSWU** – аббревиатура Guard Switch Unit (модуль коммутации Guard-экрана). Он может быть подключен к SCUU для автоматического соединения линий Guard-экранов триаксиальных кабелей при измерениях емкости и служит для стабилизации последовательной индуктивности.

**Guard-экранирование** – метод, предотвращающий появление токов утечки и заключающийся в окружении сигнальной линии активно-управляемым проводником, на котором поддерживается потенциал, одинаковый с сигналом.

**MFCMU – Модуль многочастотного измерения емкости.** Модуль, подключаемый к анализаторам B1500A и B1505A для измерения емкости в диапазоне частот от 1 кГц до 5 МГц.

**NIST – Национальный институт стандартов и технологий.** Независимое агентство министерства торговли США. NIST выпускает руководящие документы по метрологии и стандартизации. Все измерительные приборы Agilent откалиброваны в соответствии со стандартами NIST.

**PGU – Генератор импульсов.** Прибор или модуль прибора, генерирующий сверхкороткие импульсы напряжения и/или тока (в наносекундном диапазоне или более короткие).

**PLC** – аббревиатура Power Line Cycle (период колебаний промышленной частоты). Как следует из названия, это длительность одного периода частоты сети переменного тока (20 мс для 50 Гц и 16,7 мс для 60 Гц)

**SCFM** – аббревиатура Standard Cubic Feet per Minute (стандартный кубический фут в минуту). В английской системе – это величина объемного расхода газа, скорректированная для стандартных значений давления, температуры и относительной влажности. **Примечание:** будьте осторожны, так как стандартные условия могут быть различными. В метрической системе СИ используется термин «кубический метр при нормальных условиях».

**SHV** – аббревиатура Safe High Voltage (безопасный высоковольтный). SHV – это тип разъема, используемый с коаксиальными кабелями для безопасного подключения к высоковольтным источникам. В разъеме используется байонетное соединение, похожее на используемое в разъемах BNC, но отличающееся очень толстыми выступающими изоляторами. Изоляция разъемов SHV обеспечивает

безопасность при работе с высоким напряжением, предотвращая случайный контакт с находящимся под напряжением проводником при неполном сочленении частей разъема. Разъем спроектирован таким образом, что при расчленении контакт высокого напряжения разъединяется раньше контакта заземления, тем самым защищая оператора.

**SMU – Модуль «источник/измеритель».** Аббревиатура Source/Monitor Unit или Source/Measure Unit. SMU может выдавать напряжение или ток и одновременно измерять напряжение и/или ток. Хотя его часто рассматривают в качестве модуля для измерения постоянного тока, SMU обладает некоторыми возможностями для работы в импульсном режиме и режиме временной выборки.

**SMU CMU (SCUU) унифицированный модуль** – коммутационный модуль, предназначенный для работы с модулем многочастотного измерения емкости (MFCMU) анализатора B1500A и двумя SMU высокого разрешения или средней мощности. Форм-фактор SCUU позволяет разместить на нем четыре BNC-выхода MFCMU и две пары триаксиальных четырехпроводных выходов от двух HRSMU и/или MPSPMU. Модуль SCUU обеспечивает автоматическую коммутацию между MFCMU и парой HRSMU/MPSPMU, а его выходы представляют собой две пары триаксиальных выходов (источник и измеритель).

**Автоматический режим выбора диапазона** – функция измерительного прибора, при которой измерительная схема будет автоматически переключаться между измерительными диапазонами, пока не будет достигнут оптимальный диапазон измерения.

**Аналого-цифровой преобразователь (АЦП)** – схема для преобразования аналогового сигнала в его цифровой эквивалент.

**Биполярный** транзистор является альтернативой полевому. Биполярные транзисторы, в отличие от МОП-транзисторов, являются п/п приборами, управляемыми током, их работа зависит от неосновных носителей. Наиболее часто биполярные транзисторы используются в ВЧ и мощных устройствах.

**Воспроизводимость** – степень соответствия первоначально измеренной или расчетной величины результатам, полученным при повторных измерениях или вычислениях.

**Входной импеданс** – эффективный импеданс на входах электронной цепи.

**Выходной импеданс** – эффективный импеданс на выходах электронной цепи.

**Генератор сигналов и быстродействующий измеритель (WGFMU)** – измерительный модуль, генерирующий напряжение произвольной формы (с программируемым разрешением до 10 нс) и измеряющий ток и напряжение со сверхвысоким быстродействием (интервал выборки 5 нс).

**Дебаевский радиус (длина экранирования)** – в физике полупроводников решение уравнения Пуассона при наличии свободных зарядов всегда приводит к характеристике, называемой дебаевским радиусом, которая предоставляет собой значение протяженности области пространственного заряда.

**Диапазон измерений** – состояние измерительного прибора (обычно указывается кратным десяти), в котором измерительная схема внутренне настроена с целью получения оптимального результата измерения для данного диапазона значений.

**Дрейф** – сравнительно медленное изменение значений измерения прибора с течением времени, которое происходит даже тогда, когда условия для проведения измерений и измеряемая величина стабильны.

**Емкость** – величина электрического заряда, которую можно сохранить при данном электрическом потенциале. Наиболее распространенным типом конденсатора является плоский конденсатор с двумя пластинами, емкость которого определяется по формуле  $C = Q/V$ .

**Емкость плоских зон** – емкость МОП конденсатора при наличии напряжения плоских зон.

**Заземление в одной точке** – предпочтительный метод, позволяющий избежать образования паразитного контура с замыканием через землю. Все плоскости заземления подключаются к общему земле в одной точке.

**Измерение по схеме Кельвина** – этот метод, известный также под названием «четырёхпроводное» измерение, основан на использовании четырех выводов для измерения резисторов: к одной паре подключают источник тока, к другой – измеритель напряжения. Метод позволяет исключить влияние сопротивления кабеля на результат измерений.

**Импеданс** (полное сопротивление) – общее противодействие устройства или цепи, оказываемое протеканию переменного тока на заданной частоте. Он представляет собой комплексную величину, которая может быть представлена графически на векторной плоскости, где по оси  $x$  – вещественная часть (активное сопротивление  $R$ ), а по оси  $y$  – мнимая часть (реактивное сопротивление  $X$ ).

**ИУ** – аббревиатура Испытуемое Устройство. ИУ – очень общее понятие, которое может быть использовано как для простых компонентов, таких как резисторы, конденсаторы и транзисторы, так и для сложных, включая все интегральные схем (ИС).

**Клетка Фарадея** – корпус из проводящего материала (или сетки из такого материала) для защиты внутреннего пространства от воздействия окружающих электромагнитных полей.

**Коаксиальный кабель** – также называется кабелем BNC. Коаксиальный кабель состоит из внутреннего проводника, заключенного в трубку из гибкого изолирующего материала с высокой диэлектрической проницаемостью, которая, в свою очередь, окружена другим проводящим слоем, покрытым снаружи тонким изолирующим слоем.

**Коэффициент ослабления синфазного сигнала (КОСС)** – способность схемы к подавлению синфазных входных сигналов в обоих входных проводниках. КОСС является положительной величиной, измеряемой в дБ. Она равна 20 логарифмам отношения дифференциального усиления к усилению синфазного сигнала.

**МОП** – аббревиатура Металл-Оксид-Полупроводник. Самый распространенный тип структуры транзистора. МОП-транзисторы содержат затвор, выполненный обычно из металла или поликристаллического кремния и отделенный от проводящего (полупроводникового) канала слоем изолятора (обычно используется двуокись кремния). МОП-транзисторы бывают либо с каналом  $n$ - типа ( $n$ -МОП) либо  $p$ -типа ( $p$ -МОП), а схемы, содержащие транзисторы обоих типов называются комплементарными МОП (КМОП) схемами.

**Напряжение плоских зон** – напряжение ( $V_{fb}$ ), которое следует подать на МОП структуру, чтобы скомпенсировать разность работ выхода металла и полупроводника. При этом накопленный в МОП конденсаторе заряд уменьшается до нуля и возникает состояние нетеплового равновесия. В этом режиме энергетические зоны в приповерхностной области полупроводника становятся такими же горизонтальными или плоскими, как в объеме материала подложки (отсюда название: напряжение плоских зон).

**Напряжение синфазного сигнала** – разность напряжений между внутренним опорным сигналом прибора и заземленным выводом.

**Ограниченный режим с автоматическим переключением диапазонов**– функция измерительного прибора, аналогичная автоматическому выбору диапазонов, за исключением того, что измерительная схема перестанет переходить к более узкому диапазону измерений после того, как будет достигнут заданный предел.

**Паразитный контур с замыканием через землю** – нежелательное условие измерений, при котором проводящие плоскости или поверхности подключены к земле в разных точках. Так как потенциал земли в этих точках будет разным, то между ними будет протекать ток.

**Приближение обеднения** – в физике полупроводников предполагается, что полупроводниковый переход может быть разделен на отдельные области, которые либо совершенно нейтральны, либо полностью обеднены подвижными носителями.

**Разрешающая способность** – минимальная величина, которую способен точно измерить данный прибор.

**Точка росы** – значение температуры, до которой данный объем воздуха должен быть охлажден (при постоянном барометрическом давлении) так, чтобы пары воды могли образовывать конденсат.

**Точность** – степень соответствия измеренной или вычисленной величины ее действительному (истинному) значению.

**Триаксиальный кабель** – кабель, предназначенный для измерения сверхмалых токов (<1 фА). Триаксиальный кабель состоит из внутреннего проводника, заключенного в трубку из гибкого изолирующего материала с высокой диэлектрической проницаемостью, окруженной активно-управляемым проводящим guard-слоем, на котором поддерживается тот же потенциал, что и на центральном проводнике. Guard-слой, в свою очередь, окружен другим проводящим shield-слоем (естественно, тоже отделенным изоляционным материалом), покрытым с внешней стороны тонким изолирующим слоем.

**Фиксированный режим выбора диапазона** – функция измерительного прибора, при которой границы измерительного диапазона (как следует из названия) никогда не изменяются. **Примечание.** Если измеряемая величина превышает максимальное выбранного диапазона измерения, то измерение не выполняется и выдается сообщение об ошибке.

**Шумы (электронные)** – случайные изменения тока и напряжения в электронных цепях. Бывают различных видов.

## Алфавитный указатель

- Guard- и Shield-экранирование 16
  - Guard-экранирование 19
  - Shield-экранирование 16
- NBTI 95
- p-n переходы 128
- SMU
  - Источник и измеритель 30
  - Время интегрирования 46
  - Режимы работы и настройки 31
  - Обзор 28
- Биполярные транзисторы 139
- Блокировка 61
- Воспроизводимость. 13
- Время интегрирования. 44
- Диапазон измерений
  - Основы выбора 38
  - Управление диапазоном измерений 40
- Дробовой шум 26
- Емкость
  - Измерение емкости с при высоковольтном смещении постоянного тока 186
  - Высокочастотные (> 5 МГц) измерения емкости 163
  - Низкочастотные измерения емкости 156
- Четырехпроводная схема измерения (метод Кельвина) 23
- Измерения с зависимым свипированием 51
- Измерения с многоканальным свипированием 54
- Измерения с синхронным свипированием 52
  - Измерения слабых токов
  - Отладка процесса измерения слабых токов 49
  - Устранение смещения нуля 46
- Измерения со свипированием по списку 55
- Квазистатическая ВФХ 151
- Кривая Гуммеля 141
- Матричные коммутаторы 72
- Модуль заземления 34
- МОП-транзисторы
  - Эффект подложки 137
  - Измерение характеристик 136
  - Принцип работы 132
- Паразитные контуры с замыканием через землю 18
- Первичные свипирующие измерения 49
- Прослеживаемость измерений 15
- Разрешающая способность 15
- Тестирование надежности 6
- Тестовые структуры Ван дер Пау 120
- Точность 13
- Точность и воспроизводимость 13
- Усовершенствованный метод измерения ВАХ 173
- Трехэлементная модель конденсатора 165, 171
- Триаксиальные кабели 19
- Триаксиальный кабель Кельвина 25
- Удельное сопротивление 119
- Шумы при электрических измерениях 26
- Электродвижущая сила (ЭДС) 118

## Об авторе



Ален Водсворф – менеджер по развитию рынка Северной и Южной Америки, работающий в подразделении тестирования полупроводников компании Agilent. Ален Водсворф получил степень бакалавра и магистра электротехники Массачусетского технологического института, а также степень MBA университета Санта-Клара. Он имеет более чем 25-летний опыт разработки и тестирования полупроводниковых приборов.

## Agilent Email Updates

Новости по электронной почте  
[www.agilent.com/find/emailupdates](http://www.agilent.com/find/emailupdates)  
Получите последнюю информацию по  
выбранным вами приборам и приложениям.



### [www.lxistandard.org](http://www.lxistandard.org)

LXI представляет собой сетевой интерфейс, пришедший на смену интерфейсу GPIB и обеспечивающий более быстрый и эффективный обмен данными. Компания Agilent входит в число основателей консорциума LXI.

## Торговые партнеры компании Agilent

### [www.agilent.com/find/channelpartners](http://www.agilent.com/find/channelpartners)

Получите двойную выгоду: богатый опыт и широкий выбор продуктов Agilent в сочетании с удобствами, предлагаемыми торговыми партнерами.

*Microsoft® является зарегистрированным в США товарным знаком компании Microsoft Corporation.*

Agilent  
Advantage  
Services 

Услуги по техническому обслуживанию компании Agilent позволяют успешно эксплуатировать оборудование в течение всего срока службы. Мы делимся с вами опытом измерений и обслуживания, помогая создавать продукты, изменяющие наш мир. Для поддержания вашей конкурентоспособности мы постоянно совершенствуем инструменты и технологии, ускоряющие калибровку и ремонт, снижающие эксплуатационные расходы и позволяющие быть всегда впереди.

[www.agilent.com/find/advantageservices](http://www.agilent.com/find/advantageservices)



[www.agilent.com/quality](http://www.agilent.com/quality)

## Российское отделение Agilent Technologies

115054, Москва, Космодамианская наб., 52, стр. 1

Тел.: +7 (495) 7973954

8 800 500 9286 (Звонок по России бесплатный)

Факс: +7 (495) 7973902

e-mail: [tmo\\_russia@agilent.com](mailto:tmo_russia@agilent.com)

[www.agilent.ru](http://www.agilent.ru)

## Сервисный Центр Agilent Technologies в России

115054, Москва, Космодамианская наб., 52, стр. 1

Тел.: +7 (495) 7973930

Факс: +7 (495) 7973901

e-mail: [russia.ssu@agilent.com](mailto:russia.ssu@agilent.com)

Технические характеристики и описания продуктов могут изменяться без предварительного уведомления.

© Agilent Technologies, Inc. 2012

Напечатано в России, 2 апреля, 2012 г.

5990-5278RURU