

ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ И НАНОТЕХНОЛОГИЯХ

INSTRUMENTS FOR MICROELECTRONICS AND NANOTECHNOLOGY

Афонский А.А. (A. Afonskiy), Дьяконов В.П. (V. Dyakonov)

В настоящем обзоре рассматриваются измерительные приборы, которые с успехом могут использоваться в новых направлениях развития микроэлектроники и нанотехнологиях. Как известно, американский институт инженеров электротехники и электроники IEEE выпустил первый стандарт в области нанотехнологий. В настоящее время в разработке приборов для высокоточных измерений для полупроводникового и микроэлектронного производства лидирует фирма Keithley. В начале рассмотрим пикоамперметры этой фирмы.



Рис. 1. Внешний вид пикоамперметра 2502 спереди



Рис. 2. Внешний вид мультиметра 2502 сзади

Пикоамперметр — прибор для измерения очень малых токов с уровнем в наноамперы (нА), пикоамперы (пА), а в отдельных случаях и фемтоамперы (фА). Такие токи нужны для измерения сопротивления изоляции, например подзатворного диэлектрика МДП-транзисторов, их токов утечки и токов в за-

крытом состоянии. Современные цифровые пикоамперметры строятся по измерительной схеме на основе интегрального операционного усилителя с параллельной обратной связью, позволяющей получить минимальное входное сопротивление, что желательно для измерителей тока.

Двухканальный пикоамперметр 2502, один из лучших в этом классе приборов, выпускает фирма Keithley. Вид прибора спереди показан на рис. 1, а сзади на рис. 2. Входы каналов и выходы источников напряжения размещены на задней панели слева. Источники напряжения служат для питания исследуемых фотодиодов и имеют пределы изменения напряжения от 0 до ± 10 В и ± 100 В.

Основные параметры (они идентичны для каждого канала) представлены в таблице 1. Пикоамперметры обеспечивают до 58 измерений в секунду при разрешении дисплея $6\frac{1}{2}$, до 460 измерений в секунду при разрешении $5\frac{1}{2}$ и до 700 измерений в секунду при разрешении дисплея $4\frac{1}{2}$.

Одноканальный пикоамперметр Keithley 6485 (рис. 3) служит для применения в высокоскоростных измерительных системах. Он обеспечивает выполнение до 1000 операций в секунду. Пределы измерения 2, 20, 200 нА, 2, 20, 200 мкА, 2 и 20 мА. Дисплей с разрешением $5\frac{1}{2}$ обеспечивает на пределе 2 нА разрешение в 10 фА. Погрешность измерения от 0,4% + 400 фА на пределе 2 нА до 0,1% + 1 мкА на пределе 20 мА.

Прибор Keithley 6487 (рис. 4) это пикоамперметр (в оригинале picoammeter), объединенный с прецизионным источником питания. Прибор измеряет токи от 20 фА до 20 мА с максимальным разрешением 10 фА и имеет встро-



Рис. 3. Внешний вид спереди пикоамперметра Keithley 6485

енный источник питания с напряжением на выходе от 200 мкВ до 505 В. Такой широкий диапазон изменения выходного напряжения позволяет с помощью этого прибора исследовать вакуумные фотодиоды, полупроводниковые фотодиоды (в том числе лавинные) и фототранзисторы, снимать характеристики полупроводниковых диодов с малыми



Рис. 4. Внешний вид спереди пикоамперметра с источником питания Keithley 6487



Рис. 5. Внешний вид сзади пикоамперметра с источником питания Keithley 6487

обратными токами и т.д. Прибор имеет буфер на 3000 точек измерений и позволяет осуществлять программирование измерений.

Внешний вид прибора сзади показан на рис. 5. Обратите внимание, что разъем входа отсутствует на передней панели, но он есть на задней панели прибора.

Высокими техническими характеристиками при измерении токов обладает описанный выше электромметр Keithley 6517A. На самом чувствительном пре-

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПИКОАМПЕРМЕТРОВ KEITHLEY 2502

Таблица 1

Предел измерения	Максимальное разрешение	Погрешность при 25 °C ± 5 °C	Температурная погрешность	Входное сопротивление
2,000000 нА	1 фА	1,00%+ 2 пА	0,01%+200 фА	20 кОм
20,000000 нА	10 фА	0,40%+ 2 пА	0,01%+200 фА	20 кОм
200,000000 нА	100 фА	0,30%+ 200 пА	0,02%+20 пА	200 Ом
2,000000 мкА	1 пА	0,20%+ 200 пА	0,02%+20 пА	200 Ом
20,000000 мкА	10 пА	0,10%+ 20 пА	0,01%+2 нА	2 Ом
200,000000 мкА	100 пА	0,10%+ 20 пА	0,01%+2 нА	2 Ом
2,000000 мА	1 нА	0,10%+ 2 пА	0,02%+200 нА	0,2 Ом
20,000000 мА	10 нА	0,10%+ 2 пА	0,02%+200 нА	0,2 Ом

деле в 20 пА прибор обеспечивает разрешение по току в 0,1 фА.

Для измерения контактной разности потенциалов между разнородными (и даже почти однородными) металлическими контактами, измерения ЭДС термопар, оценки малой разности потенциалов пар диодов и т.д. нужны измерители малых и сверхмалых напряжений — микровольтметры и нановольтметры.

В нанотехнологиях эти приборы часто применяются совместно. Например, при измерении сопротивления или проводимости материалов и изделий из них (к примеру, нанотрубок) нужны как приборы измеряющие заданный через образец ток, так и приборы, измеряющие напряжение. Разумеется, есть



Рис. 6. Внешний вид нановольтметра 2182а (спереди)



Рис. 7. Внешний вид нановольтметра 2182а (сзади)

множество комбинированных приборов, измеряющих как ток, так и напряжение, но, как правило наилучшими метрологическими показателями отличаются приборы, оптимизированные под измерение какого либо одного параметра. К ним и относятся микровольтметры и нановольтметры постоянного напряжения.

Модель 2182А — это двухканальный прецизионный нановольтметр с 7 1/2-разрядным дисплеем и с малым уровнем шума. Внешний вид прибора спереди показан на рис. 6, а сзади на рис. 7. Помимо портов RS-232 и IEEE-

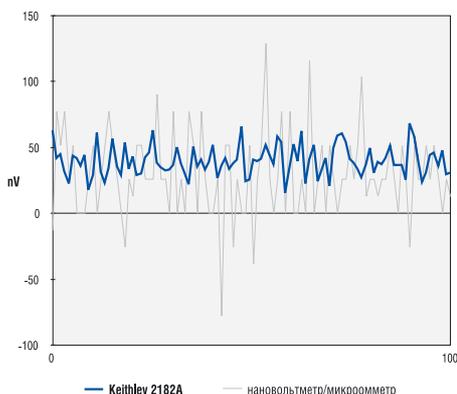


Рис. 8. Показания нановольтметров 2182А и нановольтметра/микрометра

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЕРВОГО КАНАЛА НАНОВОЛЬТМЕТРА 2182А

Таблица 2

Предел измерения	Разрешение	Входное сопротивление	Погрешность за 24 часа	Погрешность за 1 год
10.000000 мВ	1аВ	> 10 ГОм	0,002%+4 зн.	0,00005+4 зн
100.00000 мВ	10 аВ	> 10 ГОм	0,001%+3 зн.	0,00003+4 зн
1.0000000 В	100 аВ	> 10 ГОм	0,0007%+2 зн.	0,00002+2 зн
10.000000 В	1 мкВ	> 10 ГОм	0,0002%+1 зн.	0,000025+2 зн
100.00000 В	10 мкВ	10 МОм	0,001%+3 зн.	0,000035+4 зн

488 для связи с ПК на задней панели имеется выход аналогового сигнала.

Технические характеристики прибора представлены в таблице 2.

Второй канал не имеет первого и последнего пределов, в остальном параметры каналов идентичны. На первых трех пределах для первого канала (и двух для второго) приборы имеют уникально высокое разрешение в 1, 10 и 100 аВ (1 ауттоВольт = $1 \cdot 10^{-18}$ В).

Нановольтметр 2182А имеет специальный фильтр для подавления шумов с малым (применительно к этому классу приборов) временем реакции. Это позволяет уменьшить в несколько раз уровень шумов по сравнению с нановольтметром, объединенным с микроомметром. На рис. 8 показаны графики для 100 отсчетов за время около 60 мс для этих двух приборов — данные для прибора 2108а показаны более темной кривой. Измеряемый уровень сигнала составлял 40 нВ, а уровень шума соответственно около 15 нВ и 50 нВ соответственно для сравниваемых приборов.

Реальные сигналы, измеряемые измерителями сверхмалых напряжений (нановольтметрами) содержат шумы и

паразитные наводки, уровень которых нередко намного превышает уровень полезного (измеряемого сигнала). Частично от них можно избавиться, применяя фильтры низких частот, но они ухудшают динамические показатели измерителей и способны лишь ослабить,

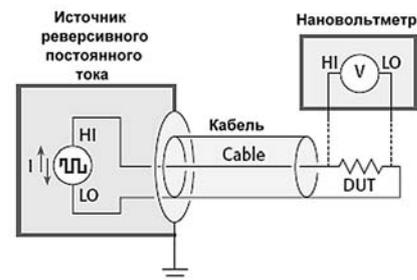


Рис. 9. Принцип работы прибора с реверсивным постоянным током

но не устранить полностью шумы и наводки. Например, практически неустранимой является погрешность от дрейфа нуля прибора и медленных компонент шума и наводок. При удалении измеряемых цепей от измерительных приборов следует отказаться от обычных проводов и перейти к экранированным проводам, например коаксиальным кабелям.

С начала эпохи появления оборудования для измерений постоянного тока после 2-й мировой войны, когда исследователи и разработчики лабораторий устремились к совершенствованию разработок полупроводниковых, беспроводных и нанотехнологических разработок, Keithley Instruments также начала формировать свою репутацию среди инженеров и ученых, занимающихся разработками в этой области. Компания, образованная Джозефом Кейтли (Joseph F. Keithley) в 1946 году в мастерской Кливленда (штат Огайо), последовательно и целенаправленно развивала индустрию контрольно-измерительного оборудования. С первых дней продукция компании разрабатывалась для правительства, а также для ученых и физиков университетов, которые положились на высокий профессиональный уровень компании в области контрольно-измерительной техники. Не секрет, что на протяжении всей истории компании нобелевские лауреаты, в своих исследованиях полагались на надежность контрольных приборов Keithley Instruments.

KEITHLEY

В течение всего следующего периода, вследствие спроса мирового рынка на полупроводниковые приборы, сотовые телефоны, портативные беспроводные устройства и бытовую электронику, портфолио компании все более пополнялось новинками в области контрольно-измерительной техники.

Понимая важность глобализации индустрии электроники, компания Keithley Instruments подписала договор с дистрибьютором в Японии в 1956 году, а, все более расширяясь, в 1956 году открыла свой офис в Европе.

К началу 2003 года 60% инвестиций компании были за пределами США. На сегодняшний день продукция Keithley Instruments продается более чем в 80 странах мира.

Компания и сейчас продолжает показывать свои возможности развития и совершенствования технологий в области контрольно-измерительной техники, проектирует, разрабатывает и продает сложные электронные инструменты и системы для производителей электроники, обеспечивая их высокоэффективными средствами для тестирования продукции, мониторингом производственных процессов, а также разработки и исследования.

В некоторых своих пикоамперметрах и нановольтметрах компания Keithley применяет оригинальный способ повышения точности измерений, основанный на использовании реверсивного постоянного тока, т.е. постоянного тока, на который наложены прямоугольные разнополярные импульсы (рис. 9). Напоминаем, что DUT — испытываемый прибор (устройство).

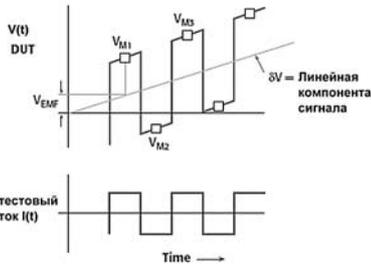


Рис. 10. Временная диаграмма работы измерителя с реверсивным постоянным током

Временную зависимость медленно случайного изменения сигнала можно считать линейной, что соответствует диаграмме работы измерителя, показанной на рис. 10.

Схема рис. 9 и временная диаграмма работы (рис. 10) показывает, что при первом и втором измерениях составляющая сдвига и линейного дрейфа входит в результат измерений, а во время от второго до третьего измерений они вычитаются. Таким образом после трех измерений на зажимах нановольтметра имеется точное напряжение V_{DUT} . Разумеется, это справедливо, если напряжение смещения и линейность дрейфа в интервалах между вычислениями сохраняются. Этот метод используется в нановольтметре 2182A и измерителях сопротивления на его основе.

Проблемы совершенствования измерительных схем особенно стоят при измерении малых сопротивлений. Хо-

рошо известная четырехпроводная схема не решает всех проблем, поскольку использует неэкранированные подводящие провода. При их большой длине они подвержены сильным наводкам. На рис. 11 показан вариант схемы с использованием коаксиальных кабелей для подвода тока и снятия напряжения с измеряемого сопротивления. Они обеспечивают высокую степень экранировки измерительной схемы, что особенно важно при измерении сопротивлений в интегральных микросхемах.

На рис. 12 показана схема измерителя сопротивлений с реверсивным источником постоянного тока и подводом его к тестируемому устройству (DUT) через экранированный кабель с компенсацией его емкости

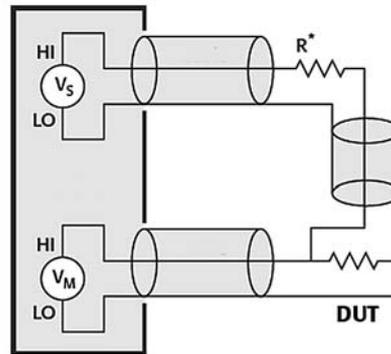


Рис. 11. Четырехпроводная схема измерения сопротивления с применением коаксиальных кабелей

Однако при этом большая емкость кабеля может привести к сильному искажению формы сигнала на испытываемом устройстве. Прецизионный повторитель напряжения GUARD (усилитель с единичным усилением) компенсирует емкость кабеля, выравнивая потенциал оплетки кабеля с потенциалом его внутреннего провода в любой момент времени.

В практике применения любых измерительных приборов важная роль

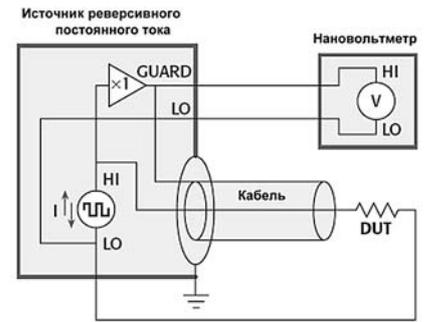


Рис. 12. Измерительная схема с реверсивным источником постоянного тока и подводом его к тестируемому устройству (DUT) через экранированный кабель с компенсацией его емкости

принадлежит различным вспомогательным приспособлениям — аксессуарам. Есть аксессуары, которые действительно имеют вспомогательное значение, поскольку на работу приборов и их метрологические показатели не влияют. Таковы, например, сумки для переноски, противоударные кейсы и т.п. Впрочем, пренебрежительное отношение к ним — до поры до времени, когда после удара дорогой прибор перестает работать или врет в показаниях, поневоле



Рис. 13. Комплект аксессуаров к нановольтметру 2182A

Нанотрубки — одно из первых применений нанотехнологий. Нанотрубка представляет собой самоорганизующуюся трубчатую молекулярную структуру, длина которой может легко наращиваться. Особенно интересны углеродные нанотрубки, которые можно использовать в качестве проводников очень малого сечения (рис. а). Исследуется возможность заполнения нанотрубок различными материалами, в том числе водой для создания сверхминиатюрных водопроводных сетей.



Рис. а. Углеродные нанотрубки

На рис. б показана стандартная 4-точечная схема измерения сопротивления углеродной нанотрубки. С помощью пары сверхминиатюрных щупов 1 и 2 к углеродной нанотрубке подводится ток. Другая пара таких щупов 3 и 4 служит для подключения к нанотрубке нановольтметра. Таким образом можно измерить падение напряжения на отрезке нанотрубки

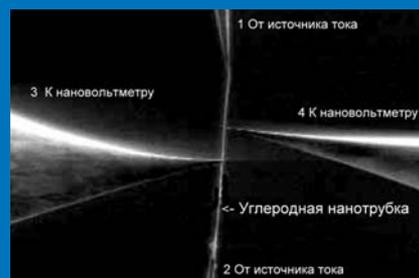


Рис. б. Измерение удельного сопротивления углеродной нанотрубки (фирма Keithley)

заданной длины и определить ее удельное (на единицу длины) сопротивление.

Пример работы с TiO_2 нанотрубкой показан на рис. в. Сама нанотрубка расположена в центре рисунка и накрыта измерительными электродами. Очевидно, что испытания таких нанотрубок требуют специального технологического и измерительного оборудования.



Рис. в. TiO_2 нанотрубка (Техасский университет в Далласе)

вспоминается полезность сумки для переноски прибора. Так что, экономить на аксессуарах не стоит!

Однако есть аксессуары, небрежное отношение к которым или их подмена просто недопустимы. Например, даже простой шуп от электрометра или нановольтметра на самом деле является важным устройством, учитывающим и охраняющим в реальных условиях вы-

Connectors, Adapters, and Tools



1.888.KEITHLEY (US) или
www.keithley.com

KEITHLEY

Рис. 14. Страница каталога изделий фирмы Keithley

сокое входное сопротивление прибора. Его замена первым попавшимся шупом от другого прибора может привести к катастрофическому снижению точности измерений в высокоомных цепях. Надо ли говорить о том, что с измерителями тока недопустимо использовать первый попавшийся шунт?



Рис. 15. Опция 1801 — предварительный усилитель

Многие приборы поставляются с комплектом специальных аксессуаров к ним (рис. 13). Их применение обязательно и рекомендуется в первую очередь во избежание больших погрешностей, которые возможны при применении различных замороженных средств.

Фирма Keithley выпускает огромную номенклатуру аксессуаров, начиная от простейших зажимов типа «крокодиль» и всевозможных защелок, различных разъемов, шупов, делителей напряжения и аттенуаторов и до огромных стоек для монтажа в них мно-

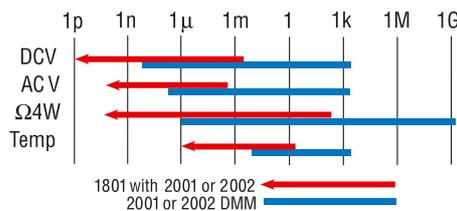


Рис. 16. Сравнение параметров приборов 2001 и 2002 без применения и с применением опции 1801

жества приборов. На рис. 14 показан вид одной из страниц обширного каталога изделий этой фирмы.

Среди важных средств расширения возможностей измерительных приборов особое значение принадлежит опциям. Опции — это дополнительные платы и устройства, которые могут вставляться в прибор или в компьютер, либо использоваться как внешние устройства. Опции применяются для увеличения чувствительности или расширения диапазонов расширяемых величин.

В качестве характерного примера рассмотрим опцию 1801 для приборов серии 2001 и 2002. Опция 1801 — это предварительный усилитель, значительно повышающий чувствительность указанных приборов. Он выполнен в литом металлическом корпусе, выполняющем функцию экрана (рис. 15).

Усилитель расширяет вниз диапазоны измеряемых параметров (DCV — напряжение постоянного тока, ACV — напряжение переменного тока, Ω4W — сопротивление при 4-точечной измерительной схеме и Temp — температурная нестабильность). Габаритные размеры опции 35×70×140 мм, масса 0,5 кг. На рис. 16 показаны сравнительные данные по параметрам приборов 2001 и 2002 без опции 1801 и с применением этой опции. Очевидно, что в области малых напряжений и токов опция существенно расширяет вниз пределы измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. Под ред. проф. В. П. Дьяконова. М.: СОЛОН-Пресс, 2007.

2. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Осциллографические пробники и их грамотное применение. Контрольно-измерительные приборы и системы, № 5 октябрь, 2007 г.

Наступила пора стандартизировать нанотехнологии — так посчитали в IEEE (Институт инженеров по электротехнике и электронике, США), выступив с инициативой стандартизации и опубликовав «дорожную карту стандартов нанотехнологий» (Nanoelectronics Standards Roadmap). Главная цель инициативы IEEE — ускорить процесс выхода нанотехнологий из лабораторных стен на рыночное пространство, где их уже давно ждут: в коммуникациях, информационных технологиях, бытовой электронике и оптоэлектронике. Значительная часть «дорожной карты» IEEE-SA посвящена углеродным нанотрубкам. В 2005 году был принят стандарт IEEE 1650, определяющий методы измерения электрических свойств углеродных нанотрубок (Standard Test Methods for Measurement of Electrical Properties of Carbon Nanotubes).

3. A Guide to Electrical Measurements for Nanoscience Applications, 1st Edition (c), Keithley, 2007.

Instruments which with success can be used in new fields of microelectronics and nanotechnology are considered in this article.

ДАТЧИКИ ПОТЕНЦИОМЕТРЫ ДЖОЙСТИКИ

MegAuto MEGATRON RotaSet Controls

В основе автоматизации любого оборудования лежит использование различных датчиков и преобразователей. Особенно актуальной является проблема увеличения производительности небольших и недорогих машин. Более чем 40 лет MEGATRON представляет на мировом рынке экономичные механические и электрические преобразователи (датчики).

ДАТЧИКИ ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ДЖОЙСТИКИ БЕСКОНТАКТНЫЕ ДАТЧИКИ ЛИНЕЙНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

БЕСКОНТАКТНЫЕ ДАТЧИКИ ВРАЩЕНИЯ ДАТЧИКИ ВРАЩЕНИЯ

КАТАЛОГИ ПРОДУКЦИИ НА САЙТЕ WWW.IRIT.RU

ИРИТ ИНСТИТУТ РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

«ИРИТ»: Москва, 115211, Каширское шоссе, дом 55, корпус 1
Телефон/факс: (495) 781-79-97
E-mail: sale@irit.ru
Internet: http://www.irit.ru

781-7997