

# ПРИБОРЫ КОМПАНИИ KEITHLEY INSTRUMENTS ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

## THE DEVICES OF KEITHLEY INSTRUMENTS FOR RESEARCHES OF SEMICONDUCTOR DEVICES AND SYSTEMS

Афонский А.А. (A. Afonskiy), доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана, Дьяконов В.П. (V. Dyakonov), д.т.н., профессор СмолГУ

Снятие входных, выходных и передаточных характеристик полупроводниковых приборов и экстракция из них электрофизических параметров является одной из важнейших и широко распространенных задач в исследовании, разработке и производстве полупроводниковых приборов и микросхем.

Данная задача требует одно- и двухканальных прецизионных источников и измерителей напряжения и тока, работающих по согласованной программе измерений. Традиционно такие приборы называются характериографами, т.е. приборами для построения электрических характеристик.

На рис. 1 показаны функциональные схемы характериографов для снятия семейства выходных и входных ВАХ биполярного транзистора.

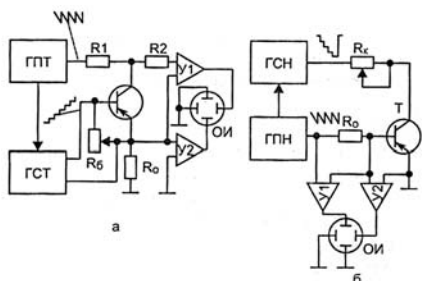


Рис. 1. Функциональные схемы характериографов для снятия семейства выходных (а) и входных (б) ВАХ биполярного транзистора

В схеме на рис. 1а в цепь базы задается ступенчато-изменяющийся ток, ступени которого соответствуют каждой кривой семейства выходных ВАХ. На коллектор подается периодически повторяющееся пилообразное напряжение — оно задает построение соответствующей кривой ВАХ. Таким образом, снимается ряд зависимостей  $U_K(I_K)$  при ряде фиксированных значений тока базы  $I_B$ .

Здесь стоит отметить один принципиальный момент. Описанная методика снятия семейства выходных ВАХ пригодна для случая, когда транзистор работает как в обычном, так и в лавинном режиме, когда выходные ВАХ имеют участки отрицательного дифференциального сопротивления, т.е. являются в общем случае S-образными. Если тран-



Рис. 2. Характериограф серии 4200-SCS компании Keithley Instruments

зистор тестируется в обычном режиме, то генератор пилообразного коллекторного тока можно заменить генератором пилообразного напряжения. Это соответствует снятию выходных характеристик в виде  $I_K(U_K)$ , обычно более принятым.

Для снятия семейства входных характеристик ступенчатое напряжение подается на коллектор транзистора, а пилообразное напряжение на базу. Так что снимается семейство зависимостей  $I_B(U_B)$  для ряда фиксирован-

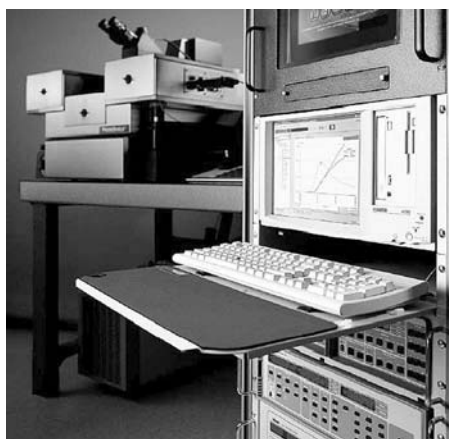


Рис. 3. Установка для тестирования полупроводниковых микроприборов

ных значений  $U_K$ . Данный способ позволяет снять как обычные входные ВАХ, так и N-образные в лавинном режиме работы биполярного транзистора.

При снятии семейства ВАХ полевых транзисторов ступенчатое напряжение

подается на затвор, а пилообразное на сток. Так что снимается семейство зависимостей  $I_C(U_C)$  при фиксированных напряжениях на затворе.

В настоящее время одним из самых известных производителей подобного оборудования является американская компания Keithley Instruments. Она выпускает многофункциональный модульный характериограф — модель 4200-SCS (рис. 2), обеспечивающий профессиональное снятие вольтамперных, вольтфарадных и импульсных характеристик полупроводниковых приборов.

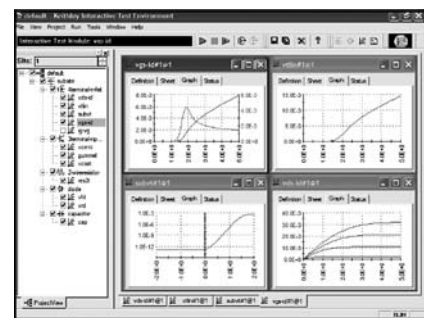


Рис. 4. Экран характериографа 4200-SCS

4200-SCS — универсальная система для измерений I-V (вольт-амперных характеристик — ВАХ) и C-V (вольт-фарадных характеристик) на постоянном токе и в импульсном режиме для полупроводниковых приборов и тестовых структур на пластине в полупроводниковом производстве имеет модульную многоканальную архитектуру и настраиваемую конфигурацию, поддерживая до 8 измерительных модулей и дополнительных модулей.

Возможно снятие входных и выходных характеристик биполярных и полевых транзисторов разного типа проводимости, а также и других электронных компонентов, например, диодов, флэш-памяти с плавающим затвором, фотоэлектрод/солнечных батарей, МОП-конденсаторов, элементов межсоединений, нанoeлектронных объектов (нанопроволок) и др. Система имеет библиотеки тестовых программ для разных видов приборов, что кардинально упрощает, ускоряет и автоматизирует даже сложные тесты.

На рис. 3 показана установка с характериографом 4200-SCS для расширенного тестирования полупроводниковых приборов и микросхем. Основное назначение системы — построение различных графических характеристик полупроводниковых приборов, например, семейств входных и выходных ВАХ, передаточных характеристик, зависимостей емкостей от напряжения и т.д.

Слева на рис. 3 виден микроманипулятор с микроскопом, а справа стойка с измерительными приборами, включая характериограф для снятия характеристик полупроводниковых микроприборов, показанный на рис. 2. Установка рассчитана на тестирование и исследование одиночных приборов.

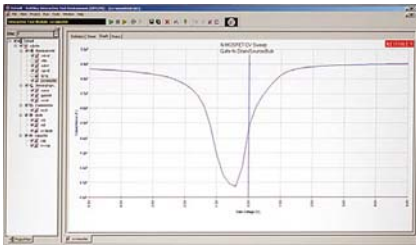


Рис. 5. Пример снятия зависимости входной емкости МДП-транзистора от напряжения на затворе

Характериограф 4200-SCS построен на основе ПК с операционной системой Windows и имеет типичный для ее приложений пользовательский интерфейс. Вид окна характериографа при отображении одновременно нескольких измеренных характеристик показан на рис. 4.

Разумеется, любую характеристику или семейство характеристик можно представить в виде одного окна. В качестве примера на рис. 5 показана зависимость входной емкости МДП-транзистора от напряжения затворок. Она имеет характерный вид с впадиной.

Одним из важных видов измерений при производстве полупроводниковых приборов являются измерения параметров во временной области.

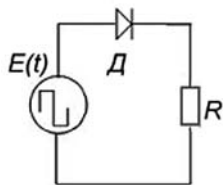


Рис. 6. Простейший диодный ключ

Обычный диод на основе р-п-перехода можно рассматривать как простейший ключ — рис. 6. При подаче на цепь диод-резистор скачка напряжения диод открывается и в нем начинается накопление зарядов носителей. Оно происходит достаточно быстро и определяется временем жизни носителей в базе диода. По мере накопления заря-

дов носителей умеренное сопротивление диода сменяется малым сопротивлением его в прямом направлении, что ведет к малому (доли В) падению напряжения на диоде. Диодный ключ открывается.

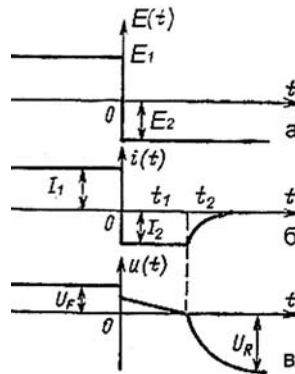


Рис. 7. Переходные процессы при заперении диодного ключа

Более существенны переходные процессы при закрытии диодного ключа, когда входное напряжение становится отрицательным (меняется с уровня  $E_1 > 0$  до  $E_2 < 0$ ). Временные диаграммы работы ключа для этого случая показаны на рис. 7.

Процесс выключения диода происходит в две стадии. На первой стадии с длительностью  $t_1$  в базе диода присутствует избыточный заряд и концентрация носителей у границы р-п-перехода (рис. 8) велика, что означает очень малое сопротивление диода. Обратный ток при этом  $I_2 = E_2/R$  неизменен и ограничен сопротивлением нагрузки R. После спада концентрации носителей до значения, соответствующего току  $I_2$ , обратный ток начинает уменьшаться и формируется стадия  $t_2$ .

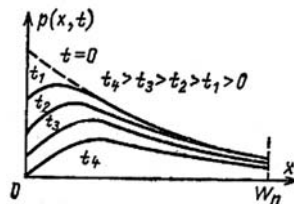


Рис. 8. Зависимости концентрации носителей в базе диода в разные моменты времени после начала выключения

У старых сплавных диодов  $t_1 \ll t_2$ , а у обычных диффузионных диодов  $t_1 \approx t_2$ . У некоторых диффузионных диодов распределение примеси в базе таково, что создается сильное тормозящее поле. В результате время  $t_1$  сильно возрастает и во время первой стадии переходного процесса из базы удаляется большая часть накопленного заряда. Такие приборы называют диодами с накоплением заряда. Одновременно малая часть оставшегося заряда удаляется очень быстро за время  $t_2 \ll t_1$ . Поэтому такие диоды называют диодами с резким восстановлением обратного сопротивления. Они применяются для фор-

**НОВОСТИ** на [www.kipis.ru](http://www.kipis.ru)

**ВЫШЛА В СВЕТ КНИГА  
«ЦИФРОВЫЕ АНАЛИЗАТОРЫ  
СПЕКТРА, СИГНАЛОВ  
И ЛОГИКИ»**

В серии «Библиотека инженера» издательства «Солон-пресс» вышла новая книга А.А. Афонского, доцента МГТУ им. Н.Э. Баумана и В.П. Дьяконова, профессора Смоленского Государственного Педагогического Университета, «Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики». Книга, впервые в отечественной литературе, представляет читателям описание современных цифровых анализаторов спектра, сигналов (в том числе, близких к монохромным и телекоммуникационных), цепей и логических состояний цифровых устройств. Особое внимание в ней уделено анализаторам спектров и сигналов реального времени, как стационарным, так и переносным с питанием от аккумуляторных батарей, а также приборам-приставкам к персональному компьютеру. Помимо этого, в книге описываются различные пассивные, активные и специализированные виды пробников для рассматриваемых приборов.



Авторы уделили много внимания особенностям подключения осциллографов и анализаторов к ПК и использованию специализированных программных сред таких, как MATH-LAB, NI SignalExpress Tektronix Edition, R&S FreRes и др. для работы с измерительным оборудованием и анализа сигналов.

Книга содержит наиболее полный обзор анализаторов, присутствующих на российском рынке. При этом рассматривается оборудование как ведущих зарубежных производителей таких, как Tektronix, Agilent Technologies, Rohde&Schwarz, так и отечественных, таких, как АКТАКОМ и др. Читатели найдут большое количество примеров реальной работы с данными приборами и, безусловно, книга будет полезна для инженеров-разработчиков электронной техники, научных работников исследовательских институтов, преподавателей, аспирантов и студентов университетов технического профиля.

мирования перепадов напряжения и тока малой (даже субнаносекундной) длительности.

Для своей системы 4200-SCS компания Keithley Instruments выпускает платы расширения — двухканальный генератор импульсов и широкополосный цифровой осциллограф. Их применение расширяет возможности системы в контроле параметров полупроводниковых приборов, в число которых включаются и временные параметры.



Рис. 9. Плата генератора импульсов Model 4205-PG2 компании Keithley Instruments

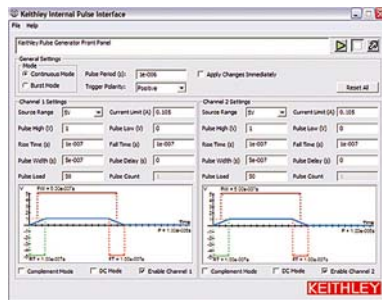


Рис. 10. Окно платы генератора импульсов Model 4205-PG2 компании Keithley Instruments

Плата генератора импульсов Model 4205-PG2 показана на рис. 9. Плата обеспечивает получение импульсов с амплитудой до  $\pm 20$  В на нагрузке 50 Ом и до  $\pm 40$  В на нагрузке 1 МОм с периодом повторения импульсов от 20 нс до 1 с. Программным путем задается длительность импульса от 10 нс до бесконечности (постоянный ток). Возможно задание сигналов произвольной формы с числом точек до 256 тысяч.

Плата генератора импульсов вставляется в блок характериографа системы 4200-SCS. На экран прибора можно вывести окно генератора, показанное на рис. 10. Оно обеспечивает простой и вполне очевидный интерфейс пользователя, позволяющий наблюдать стили-

стически форму генерируемых импульсов и устанавливать их параметры для каждого из двух каналов. Форма и параметры импульсов задаются, исходя из решаемой при тестировании задачи.

PCI-плата цифрового осциллографа Model 4200-SCP2 двухканальная с полосой частот каждого канала от 0 до 750 МГц и частотой выборок до 2,5 ГГц в режиме поочередного использования каналов и 1,25 ГГц при обычном использовании каналов. Длина памяти для хранения точек осциллограмм до 1 Мб на каждый канал. Другая плата Model 4200-SCP2HR рассчитана на получение осциллограмм с высоким разрешением — до 16 бит, но с меньшей частотой выбор-

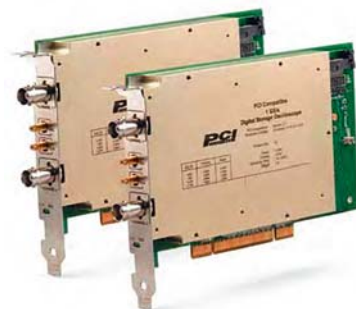


Рис. 11. Платы двухканальных цифровых осциллографов компании Keithley Instruments

Измерение времен переключения диодов не имеет особо тонких моментов. Нужен лишь генератор импульсов с достаточно малыми временами нарастания и спада и осциллограф с малым временем нарастания переходной характеристики. Для подавляющего большинства диодов и ключей измерение их времен переключения достаточно использовать генератор AFG3000 и осциллограф серии DPO3000/4000/5000 (Tektronix).

Основной схемой включения биполярного транзистора в ключевом режиме работы является схема с общим эмиттером, представленная на рис. 1. При  $E(t)=E_1$  в цепи базы протекает отпирающий транзистор ток  $I_{B1}=(E_1-U_{B0})/R_B$ . Если он больше тока  $E_K/BR_K$ , то транзистор входит в насыщение и напряжение на коллекторе падает до долей В (и даже меньше 0,1 В у маломощных ключей). Если  $E(t)=E_2<0$ , то транзистор закрыт и ток в цепи коллектора близок 0 (или точнее равен обратному току коллекторного перехода в сумме с токами утечки). Таким образом, биполярный транзистор обладает ярко-выраженными ключевыми свойствами.

Расчетные временные зависимости при переключении ключа рис. 1 представлены на рис. 2.

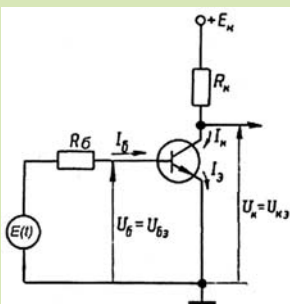


Рис. 1. Ключ на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером

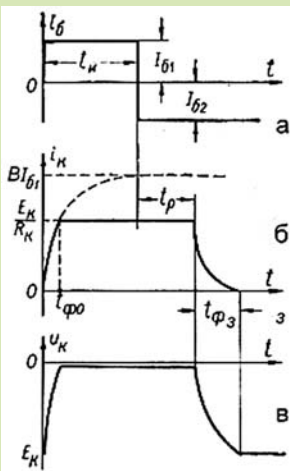


Рис. 2. Временные зависимости работы ключа: тока базы (а), тока коллектора (б) и напряжения на коллекторе

Для тестирования ключа можно использовать генератор AFG3000 и осциллограф DPO 3000/4000/5000. На рис. 3 показаны осциллограммы импульсов на входе ключа рис. 1, базе и коллекторе транзистора, при использовании кремниевое планарно-эпитаксиального транзистора 2Т312В при  $R_B = 10$  кОм,  $R_K = 1$  кОм,  $E_K = 15$  В. Осциллограммы хорошо подтверждают расчетный вид временных зависимостей на протяжении в схеме работы рис. 3 и физику его работы. Из них нетрудно оценить значения временных параметров переключения ключа. В частности, параметры импульса на коллекторе транзистора измерены автоматически и данные о них есть под осциллограммами. Время спада напряжения на коллекторе около 109 нс, а время нарастания около 138 нс при амплитуде импульса 14,87 В. Отсюда ясно, что напряжение на коллекторе транзистора в режиме насыщения составляет всего 0,13 В при токе коллектора 15 мА.

Для повышения скорости переключения ключа нужно увеличивать токи включения  $I_{B1}$  и выключения  $I_{B2}$ . Их достаточно увеличивать в небольшие отрезки времени включения и выключения транзистора. Простейший способ достижения этого — применение ускоряющего конденсатора  $C_y$

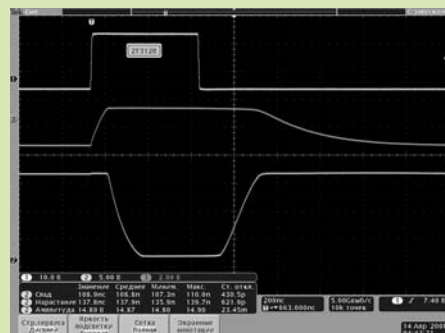


Рис. 3. Осциллограммы импульсов на входе ключа рис. 1 (а), базе транзистора (б) и коллекторе (в)

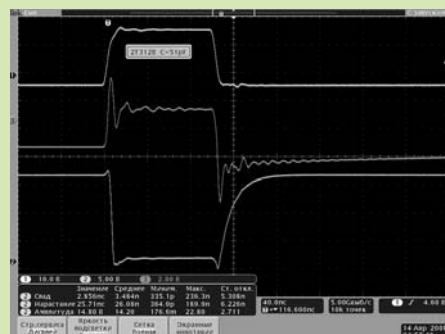


Рис. 4. Осциллограммы импульсов ключа на биполярном транзисторе при включении параллельно  $R_K$  ускоряющего конденсатора с емкостью 51 пФ

малой емкости (обычно десятки пФ), включаемого параллельно резистору  $R_B$ . На рис. 4 показаны осциллограммы описанного ключа при включении ускоряющего конденсатора  $C_y = 51$  пФ. При этом время спада напряжения на коллекторе уменьшилось почти до 3 нс, а время нарастания до 26 нс.

ки — до 400 Мб/с. Внешний вид плат расширения компании Keithley Instruments показан на рис. 11. Платы могут устанавливаться в слоты расширения любого ПК с системной шиной PCI и превращают такой ПК в полноценный цифровой запоминающий осциллограф.

На рис. 12 представлено окно платы осциллографа 4200-SCP2. Это окно также имеет вполне очевидный интерфейс и позволяет наблюдать осциллограммы исследуемых сигналов и осуществлять установки осциллографа. С помощью соответствующего программного обеспечения, например матричной программы MATLAB, можно решать практически любые задачи обработки осциллограмм, например, определять по заданным критериям времена переключения диодов или иных полупроводниковых приборов.



Рис. 12. Окно платы цифрового осциллографа 4200-SCP2 компании Keithley Instruments

В настоящее время в импульсных и цифровых устройствах наибольшее применение находят полевые транзисторы, особенно типа МДП со структурой металл-диэлектрик-полупроводник [1, 2]. Пример функциональной схемы тестирования МДП-транзистора показан на рис. 13 (DC — цепи постоянного тока, AC — цепи переменного, точнее импульсного, тока).

При снятии динамических характеристик полупроводниковых приборов и интегральных микросхем приходится считаться с тем, что времена переключения приборов могут быть очень малыми (наносекунды и даже доли наносекунды). В этом случае подключение приборов должно осуществляться по правилам 50-омной техники с примене-



Рис. 13. Пример функциональной схемы тестирования МДП-транзистора

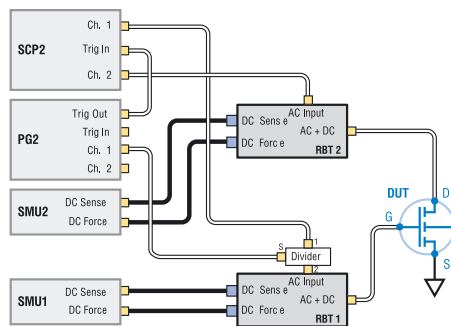


Рис. 14. Пример функциональной схемы тестирования в динамике полевого МДП-транзистора

нием стандартных коаксиальных разъемов и кабелей. В противном случае искажения импульсов, как тестирующих, так и выходных будут совершенно недопустимыми.

Рисунок 14 показывает, как это делается на примере тестирования полевого МДП-транзистора — наиболее распространенного ключевого прибора, как микромощного, так и мощного. Все соединения сделаны отрезками коаксиального кабеля, используются приборы компании Keithley Instruments.

При тестировании МДП-транзисторов с помощью системы 4200-SCS компании Keithley Instruments есть возможность удобно сконфигурировать измерительную схему в окне характеристики прибора — рис. 15. После этого можно задать как просмотр форм временных зависимостей напряжений и токов, так и построение выходных и передаточных характеристик приборов импульсным методом.

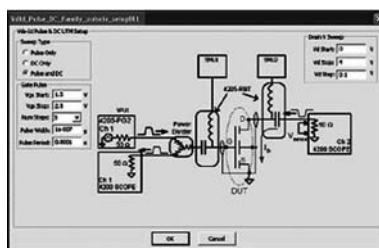


Рис. 15. Конфигурирование измерительной схемы при тестировании МДП-транзистора с помощью системы 4200-SCS

Возможности параметров системы 4200-SCS позволяют тестировать большую часть серийных полевых транзисторов, как МДП-типа, так и с управляющим р-п-переходом, при выходном сопротивлении генератора импульсов 50 Ом. Однако, результаты тестирования мощных МДП-транзисторов (особенно силовых) могут оказаться неудовлетворительными из-за очень большой входной емкости этих приборов — до сотен и даже тысяч пФ. Чтобы приборы реализовали малые времена переключения нужно малое сопротивление генератора — до нескольких Ом. Это видно, например, из осциллограмм ключа на высоковольтном силовом мощном МДП-транзисторе КП701, показанных на рис. 16.

Для испытания подобных приборов нужны специальные генераторы импульсов. Они могут быть построены, например, на лавинных транзисторах, применение которых для запуска мощных МДП-транзисторов подробно описано в [1, 2].

В заключении можно сделать вывод, что современные системы тестирования полупроводниковых приборов, рассмотренных нами на примере решений от компании Keithley Instruments обеспечивают подробное и точное исследование всех необходимых характеристик

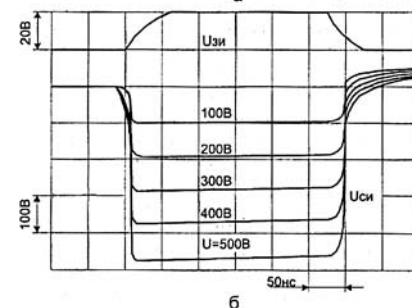
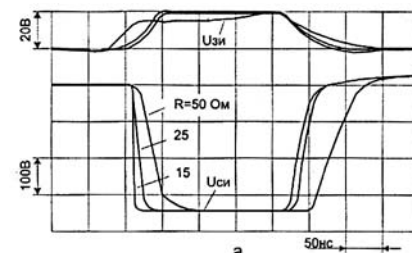


Рис. 16. Осциллограммы напряжений на затворе и на стоке мощного МДП-транзистора КП701 при разных сопротивлениях генератора (а) и разных напряжениях питания (б)

приборов, отлично поддаются документированию и анализу, а также построению на их базе автоматизированных систем эксперимента и контроля качества полупроводникового производства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Схемотехника устройств на мощных полевых транзисторах: Справочник/ В. В. Бачурин, В. Я. Ваксембург, В. П. Дьяконов, А. А. Максимчук, В. Ю. Смердов и А. М. Ремнев. Под ред. В. П. Дьяконова. М.: Радио и связь, 1994.
2. Дьяконов В. П., Максимчук А. А., Смердов В. Ю., Ремнев А. М. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах. Под ред. проф. В. П. Дьяконова. М.: СОЛОН-Р, 2002.

*In this article the author contemplates the methods of semiconductor performances research and test with help of the devices of Keithley Instruments. The author tells about 4200-SCS semiconductor characterization system and its plug-in cards. They are model 4200-SCP2 dual-channel oscilloscope and model 4205-PG2 dual-channel pulse generator cards.*