

## Автоматическая измерительная система для исследования полупроводниковых приборных структур

Ю.Н. Горелов, Д.Ю. Голубева, Л.В. Курганская, А.В. Щербак

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева  
443086, Российская Федерация, г. Самара  
Московское шоссе, 34

Рассмотрены вопросы разработки автоматической измерительной системы для исследования параметров полупроводниковых приборных структур, которая может использоваться как при экспериментальной отработке технологии получения структур, так и для проведения исследований стойкости структур к воздействию различных внешних факторов, включая факторы открытого космического пространства. Предложена структурная схема измерительной системы, позволяющей изменять свою конфигурацию программным способом для увеличения числа измеряемых параметров. Предложен вариант коммутации измерительных портов и узлов измерительной системы, при котором все порты идентичны, что дает возможность подключать к системе образцы с различной топологией и числом контактов, необходимо только чтобы суммарное число контактов всех образцов не превышало числа измерительных портов системы. Предложены возможные варианты схем измерительных узлов, реализующих преобразования напряжение-код, емкости-код, код-ток и т. д.

*Ключевые слова:* приборные структуры, электрофизические параметры, автоматические измерительные системы.

### Введение

В последнее время наблюдается интенсивное изучение пленочных приборных структур [1–6], на основе которых могут быть реализованы различные типы датчиков физических величин (температуры, давления, освещенности, радиации, магнитного поля, мультифункциональные и т. п.). При экспериментальных исследованиях полупроводниковых приборных структур требуется проводить большой объем измерений различных по характеру параметров одной и той же группы образцов [7–9]. Необходимо измерять удельное сопротивление функциональных слоев, подвижность носителей заряда, время жизни неравновесных носителей заряда, вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики и пр. при различных температурах, различных уровнях освещенности и других внешних воздействующих факторах [7–9]. Поэтому задачи исследования таких сложных объектов как параметры полупроводниковых структур, с учетом повышенных требований к точности и воспроизводимости измерений приводят к необходимости автоматизации электрорадиоизмерений и управления измерительным экспериментом.

Построение цифровых средств измерений и создание автоматизированных измерительных систем с использованием микропроцессоров по-

зволяет программным способом перестраивать систему для измерения различных физических величин и менять режимы измерений. При этом аппаратная часть измерительной системы не изменяется. Использование современной компонентной базы позволяет создавать такие измерительные системы в виде компактных блоков, включающих как высокочувствительные измерительные цепи, так и узлы цифровой обработки и регистрации данных [10].

В данной работе предпринята попытка разработки компактной автоматической измерительной системы для исследования электрофизических параметров приборных структур, которая может использоваться как при экспериментальной отработке технологии получения структур, так и для исследования влияния воздействия внешних факторов, включая факторы открытого космического пространства при эксплуатации в составе космического аппарата.

### 1. Структура измерительной системы

Измерительная система должна быть реализована в виде единого блока, включающего в себя схемы измерения следующих электрофизических параметров исследуемых структур:

- удельное сопротивление;
- ЭДС Холла;

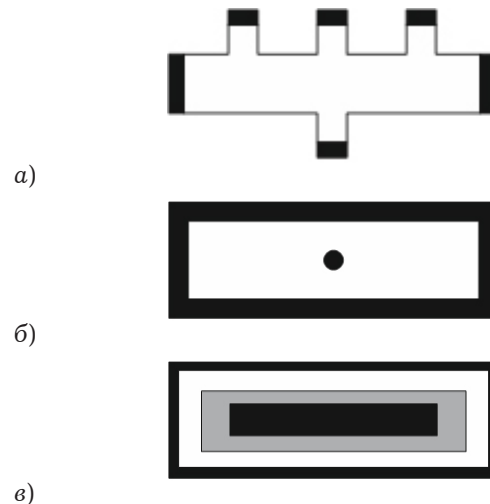
- время жизни неравновесных носителей заряда;
- вольт-амперная характеристика;
- вольт-фарадная характеристика;
- время релаксации инверсного слоя в структуре металл-диэлектрик-полупроводник, микроконтроллер, энергонезависимую память, стандартные интерфейсы передачи данных.

Так как рассматриваемая измерительная система имеет специальное назначение, то номенклатура и параметры входящих в ее состав измерительных узлов определяются заданным набором измеряемых величин, методами их определения и топологией исследуемых образцов. Приведем краткий анализ методов измерения электрофизических параметров полупроводниковых структур. Измерение удельного сопротивления основано на измерении разности потенциалов на участке полупроводника при пропускании через него тока известной величины [7–8], следовательно, для измерения удельного сопротивления необходимы регулируемый источник постоянного тока и измеритель напряжения с дифференциальным входом. Для измерения могут использоваться образцы, показанные на рис. 1, а и б.

Измерение ЭДС Холла также основано на измерении разности потенциалов между холловскими контактами образца, находящегося в магнитном поле, при пропускании через него постоянного или переменного тока известной величины [9]. Таким образом, для измерения ЭДС Холла необходимы регулируемый источник постоянного тока и измеритель напряжения с дифференциальным входом. Топология образцов показана на рис. 1, а.

Измерение времени жизни неравновесных носителей заряда производится методом модуляции проводимости (сопротивления), которая может осуществляться либо с помощью периодического освещения образца [7–8], либо периодической инжекцией неосновных носителей заряда через металлический контакт [7]. Для измерения проводимости, как и для измерения удельного сопротивления, необходимы источник тока и измеритель напряжения, однако в данном случае они должны обладать достаточным быстродействием, так как время спада проводимости может принимать значения от долей микросекунды до нескольких десятков секунд [7–8]. Топология образцов показана на рис. 1, б.

Емкостные методы измерения параметров полупроводниковых структур (измерение вольт-



**Рис. 1.** Топология образцов приборных структур. Светлые области – полупроводник; черные области – металлические контакты; серая область – диэлектрик

фарадных характеристик) основаны на определении зависимости емкости структуры от постоянного напряжения смещения [11–12]. Для реализации емкостных методов необходим измеритель емкости и программируемый источник напряжения смещения. Топология образцов показана на рис. 1, в.

Из приведенного анализа видно, что для измерения всей совокупности параметров необходимы следующие измерительные узлы:

- быстродействующий преобразователь напряжение–код с дифференциальным входом;
- быстродействующий преобразователь код–ток;
- быстродействующий преобразователь код–напряжение (может быть объединен в один узел с преобразователем код–напряжение);
- преобразователь емкость–код.

При измерении того или иного параметра система должна коммутировать измерительные узлы, задавать величины измерительных токов или напряжений и измерять соответствующие параметры. Структурная схема такой измерительной системы представлена на рис. 2. Система имеет в своем составе коммутатор 1, преобразователь напряжение–код 2 с дифференциальными входами  $V+$  и  $V-$ , преобразователь код–ток 3, преобразователь код–напряжение 4, преобразователь емкость–код 5, микроконтроллер 6, энергонезависимую память 7 и стандартный интерфейс 8.

Коммутатор 1 имеет  $n$  независимых портов  $X1-Xn$ , каждый из которых может подключаться к измерительным узлам 2–5 или к общему проводу. Число портов  $n$  определяется количе-

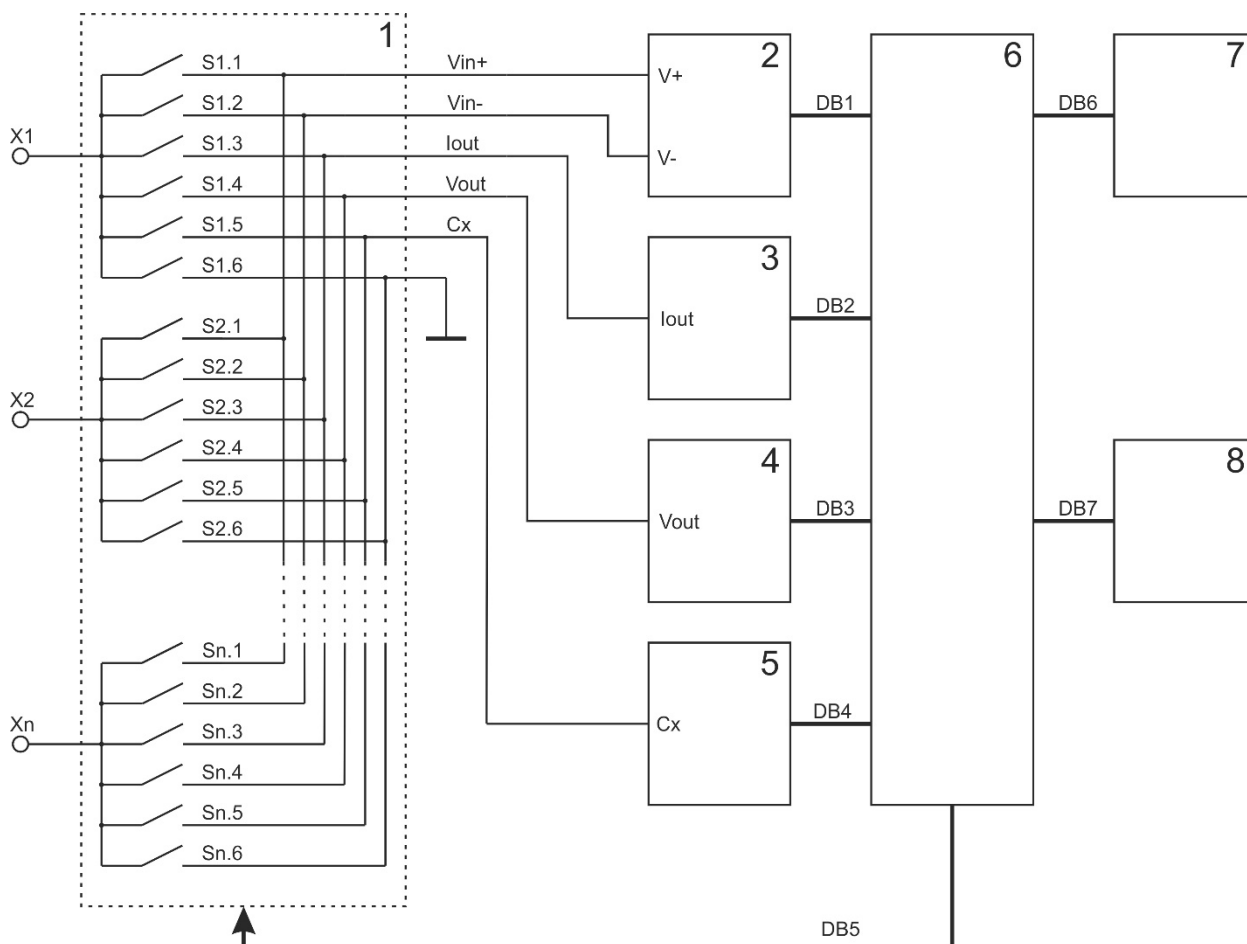


Рис. 2. Структурная схема измерительной системы

ством и топологией подключаемых образцов. Исследуемые образцы подключаются к портам X1... Xn. Так как все порты идентичны, то образцы могут подключаться произвольным образом, а их подключение к измерительным узлам задается управляющей программой микроконтроллера.

Система работает следующим образом. В исходном состоянии все ключи коммутатора разомкнуты. Для измерения определенного параметра исследуемого образца на соответствующие ключи коммутатора подается управляющее напряжение от микроконтроллера и образец подключается к измерительным узлам. Далее система производит измерение в соответствии с управляющей программой микроконтроллера.

## 2. Преобразователь напряжение–код

Измеритель напряжения состоит из входного повторителя напряжения и аналого-цифрового преобразователя с дифференциальным входом. Схема измерителя напряжения показана на рис. 3. Быстродействие преобразователя определяется быстродействием АЦП и входных повторителей напряжения. При использовании

современной компонентной сравнительно легко достичь быстродействия порядка 10 миллионов операций в секунду.

## 3. Преобразователи код–ток

Преобразователь код–ток может быть построен на основе преобразователя напряжение–ток (ПНТ), на вход которого подается выходное напряжение цифро-аналогового преобразователя. В литературе приводятся различные схемы ПНТ [13–14]. Хорошими характеристиками обладают ПНТ на основе операционных усилителей (ОУ). Для работы в составе рассматриваемой измерительной системы ПНТ, он должен удовлетворять следующим требованиям:

- работать с заземленной нагрузкой;
- обеспечивать заданную величину тока и требуемую точность без настройки и подбора каких-либо элементов схемы.

Один из возможных вариантов построения ПНТ, удовлетворяющего указанным условиям показан на рис. 4. Схема работает следующим образом. Выходная цепь ОУ А1 состоит из последовательно соединенных элементов:

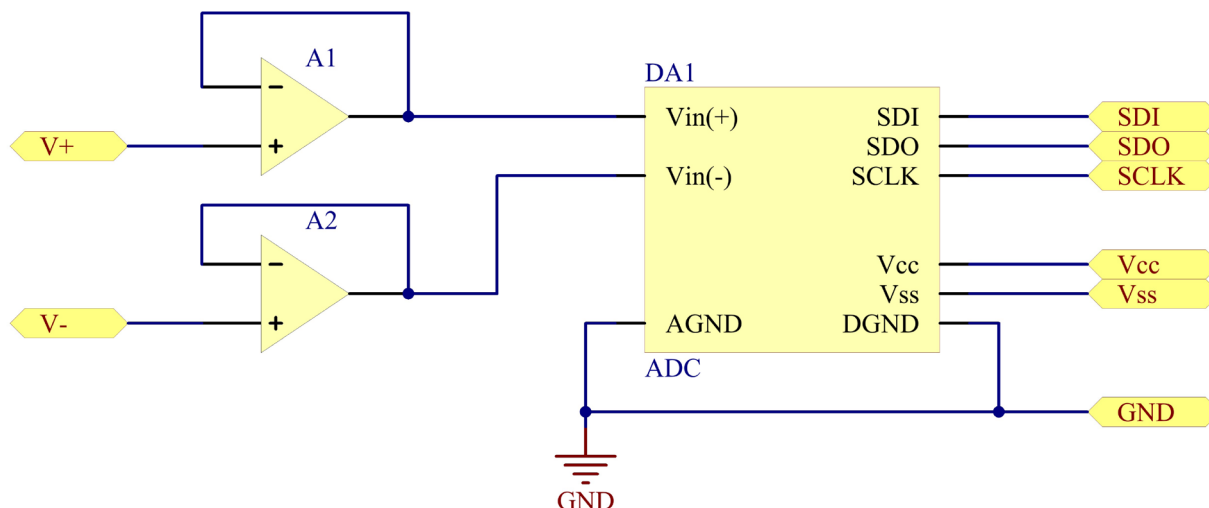


Рис. 3. Преобразователь напряжение-код

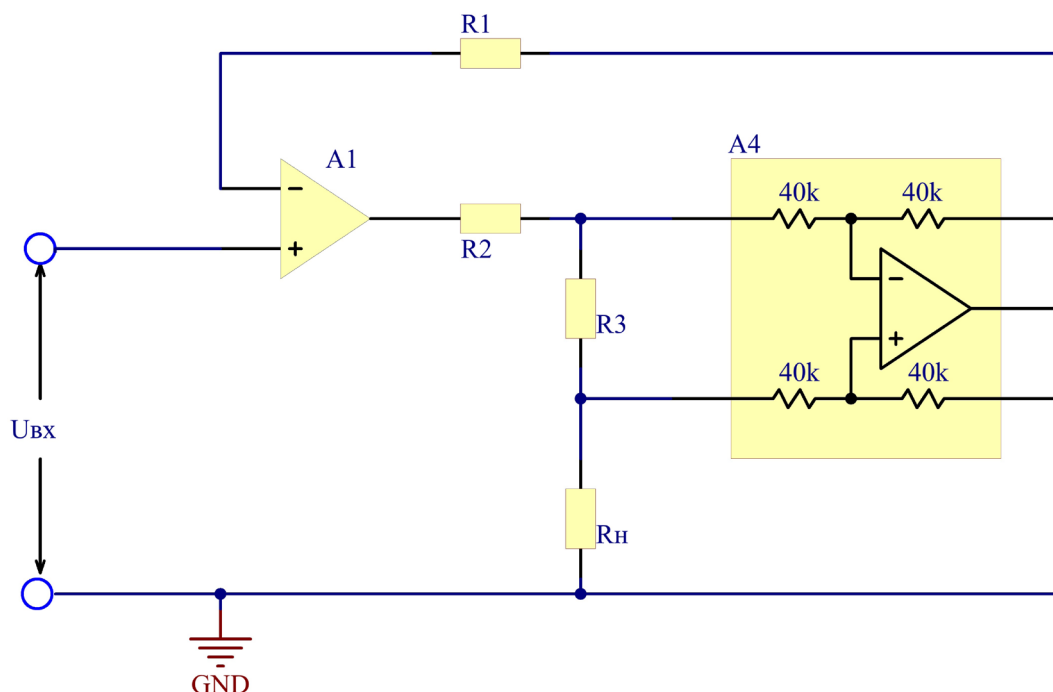


Рис. 4. ПНТ с заземленной нагрузкой

- сопротивления  $R_2$ , которое ограничивает максимальный ток нагрузки;
- сопротивления  $R_3$ , выполняющего роль датчика тока;
- сопротивления нагрузки.

Сигнал с датчика тока подается на входы дифференциального усилителя A2, сигнал с выхода дифференциального усилителя поступает на инвертирующий вход ОУ A1. На неинвертирующий вход ОУ A1 относительно земли подается входное напряжение  $U_{вх}$ . Схема поддерживает постоянное напряжение на резисторе  $R_3$ , а, следовательно, и ток через него, который в свою очередь является током нагрузки. Ток нагрузки выражается формулой:

$$I_n = U_{вх} / (A_D R_3),$$

где  $A_D$  – коэффициент передачи дифференциального усилителя.

Использование дифференциального усилителя в интегральном исполнении обеспечивает получение стабильного коэффициента усиления без подбора резисторов. Если сопротивления эталонного резистора и нагрузки более единиц кОм, то для исключения шунтирования этого резистора входным сопротивлением дифференциального усилителя необходимо подключать входы дифференциального усилителя к выводам эталонного резистора через повторители напряжения, как показано на рис. 5.

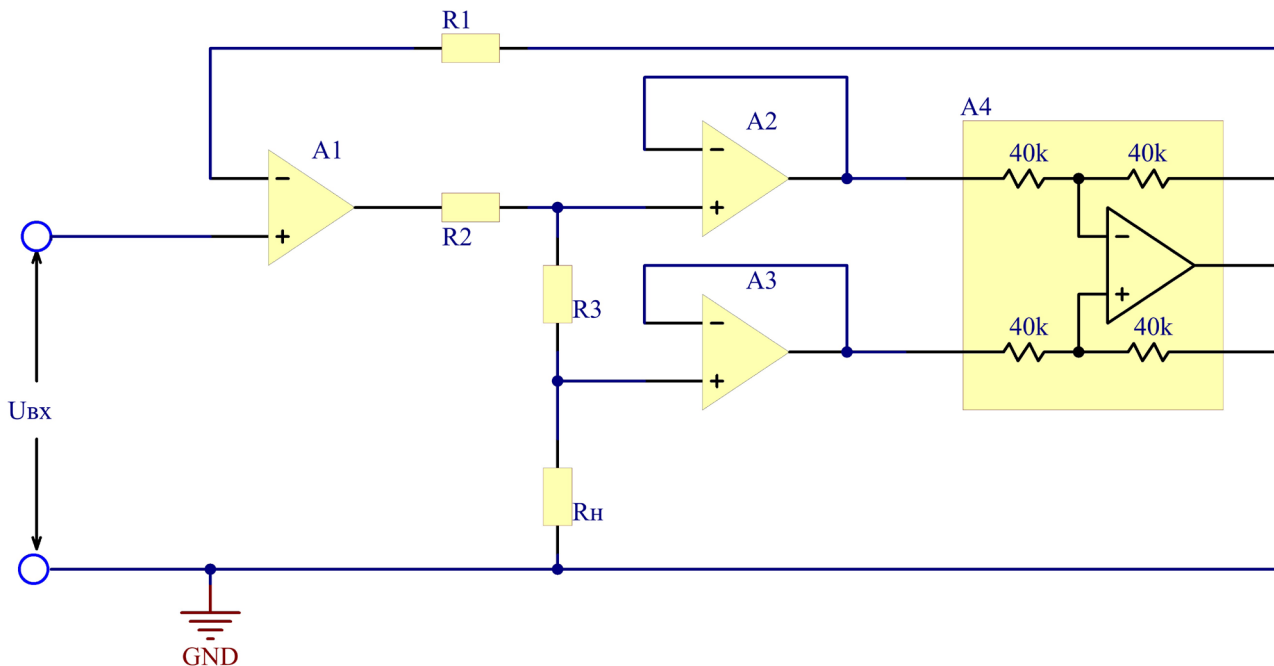


Рис. 5. ПНТ с заземленной нагрузкой для высокоомной нагрузки

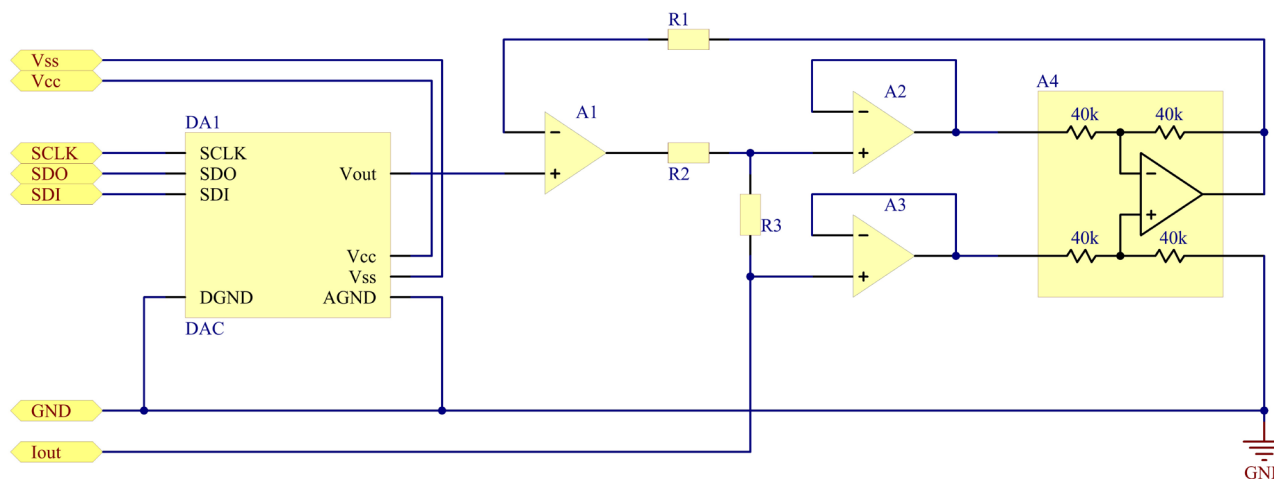


Рис. 6. Преобразователь код-ток

Схема преобразователя код-ток показана на рис. 6. Точность и быстродействие данной схемы определяется параметрами ЦАП. Для работы в составе измерительной системы достаточно использовать 16 разрядный АЦП с быстродействием до 10 миллионов операций в секунду.

#### 4. Преобразователь код-напряжение

В качестве преобразователя код-напряжение проще всего использовать обычный АЦП. Если требуемый диапазон выходных напряжений не совпадает с выходным диапазоном используемого АЦП, то можно использовать масштабирующий усилитель, однако в этом случае возможно увеличение систематической погрешности преобразования кода в напряжение, что обусловлено неточной установкой коэффициента усиления масштабирующего усилителя.

#### 5. Преобразователь емкость-код

Преобразователь емкость-код может быть построен на основе преобразователя емкость-напряжение (ПЕН), выходной сигнал которого преобразуется в код с помощью АЦП.

Принципиальная схема простого ПЕН, приведена на рис. 7.

Сигнал с генератора синусоидального напряжения DA1 поступает на аттенуатор (элементы A3, R3, R5). Выход аттенуатора подключен к делителю напряжения, образованному конденсатором C6 и измеряемой емкостью, подключаемой между CX и GND. К выводу CX измеряемой емкости через повторитель напряжения A1 подключен к амплитудному детектору (элементы A2, C5, D1, D2, R1, R2, R4), выходное напряжение которого связано с величиной из-

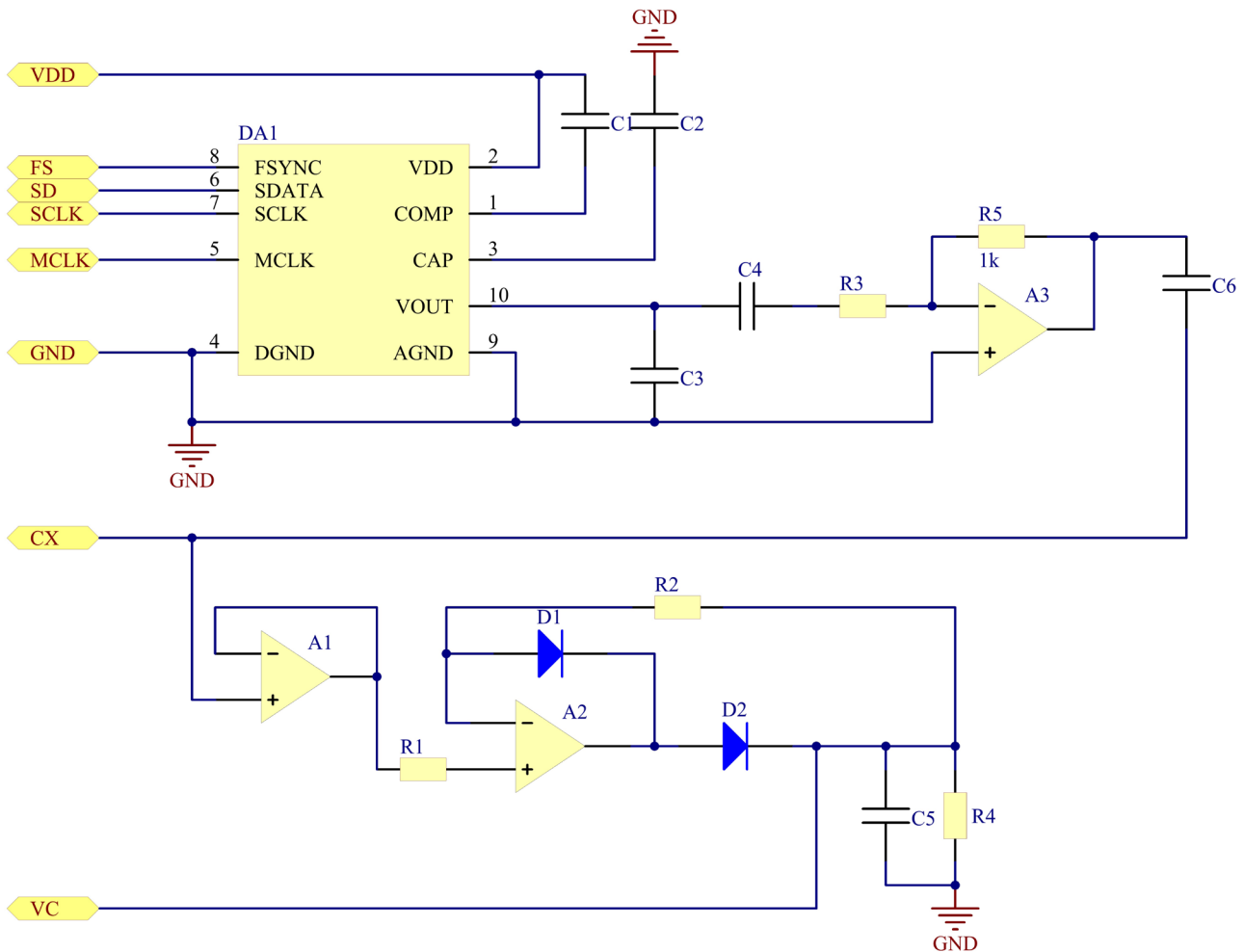


Рис. 7. Принципиальная схема ПЕН

меряемой емкости. Частота генератора задается цифровым кодом и может меняться в широких пределах (от единиц Гц до десятков МГц).

Выходное напряжение ПЕН определяется формулой

$$U_x = I \frac{1}{\omega C_x} = \frac{U_m}{1 / (\omega C_6) + 1 / (\omega C_x)} \frac{1}{\omega C_x} =$$

$$= \frac{U_m}{C_x / C_6 + 1} = \frac{U_m C_6}{C_x + C_6},$$

где  $U_m$  – амплитуда колебаний на выходе ОУ А3.

Для преобразования  $U_x$  в цифровой код можно либо скоммутировать выход ПЕН на вход преобразователя напряжение–код, либо использовать отдельный АЦП.

## 6. Микроконтроллер, энергонезависимая память, интерфейс

Выбор микроконтроллера определяется числом измерительных портов  $X1-Xn$ , типами примененных АЦП и ЦАП, наличием встроенных интерфейсов и пр. Энергонезависимая память в основном служит для хранения полученных дан-

ных. Ее емкость определяется объемом хранимых данных, который в свою очередь зависит от интенсивности работы системы, периода актуальности данных и т. д. В качестве энергонезависимой памяти удобно использовать интегральные микросхемы NAND FLASH, широко доступные в настоящее время. Современные микроконтроллеры обычно содержат в своем несколько типов стандартных интерфейсов: SPI, USART, USB, CAN и пр., в связи с чем реализация интерфейсов затруднений не вызывает.

## 7. Измерение параметров образцов

Рассмотрим процесс измерения параметров образцов приборных структур, подключенных к портам измерительной системы как показано на рис. 8.

Для измерения удельного сопротивление образца, имеющего топологию, показанную на рис. 1, а, и подключенного к измерительной системе по схеме, показанной на рис. 8, вначале необходимо замкнуть ключи S1.3, S2.1, S4.2 и S5.6, в результате чего контакты 1 образца будет

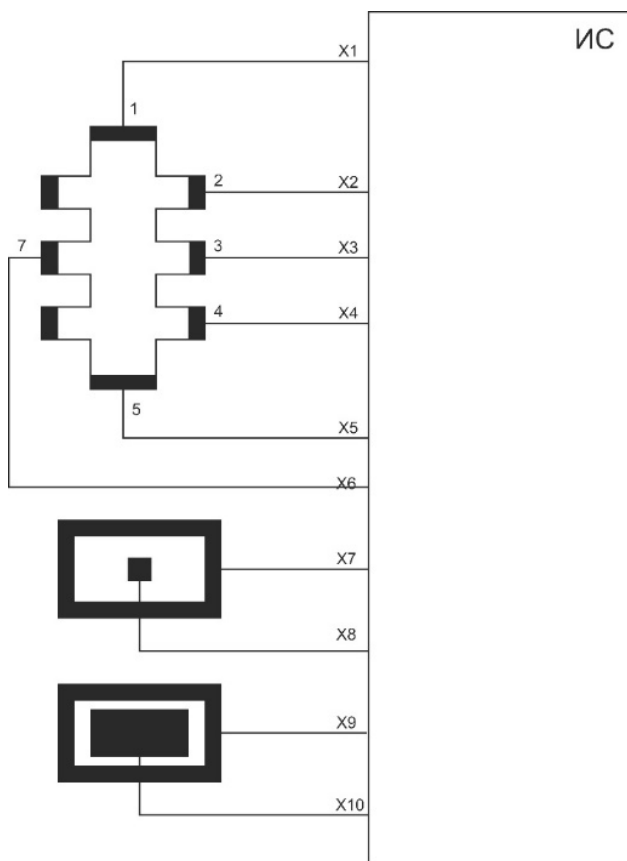


Рис. 8. Вариант подключения образцов к измерительной системе

подключен к выходу преобразователя код-ток, контакт 5 будет подключен к общему проводу, а контакты 2 и 4 будут подключены к входам преобразователя напряжение-код. Далее по командам микроконтроллера преобразователь код-ток задает необходимое значение силы тока через образец, а преобразователь напряжение-код измеряет разность потенциалов между 2-м и 4-м контактами образца. По результатам измерений контроллер вычисляет удельное сопротивление, записывает его значение в энергонезависимую память и выдает результат в стандартный интерфейс. Чтобы изменить направление протекающего тока достаточно разомкнуть ключи S1.3, S5.6 и замкнуть ключи S1.6 и S5.3.

Аналогично, но с другой коммутацией ключей, производится измерение ЭДС Холла и вольт-амперных характеристик.

Для измерения ВФХ образца 3 необходимо замкнуть ключи S9.4, S9.5 и S10.6, в результате чего верхний по схеме контакт образца подключается к источнику напряжения смещения (преобразователь код-напряжение) и преобразователю емкость-код, а нижний – к общему проводу. Затем на образец подается напряжение смещения и одновременно измеряется его ем-

кость. По окончании измерений все ключи замыкаются.

## Заключение

Показана необходимость разработки автоматической измерительной системы для комплексного исследования электрофизических параметров полупроводниковых приборных структур.

Предложен вариант измерительной системы с программно изменяемой конфигурацией, для измерения и регистрации сопротивления, ЭДС Холла, вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик образцов различной топологии.

Предложены возможные варианты схем измерительных узлов, реализующих преобразования напряжение-код, емкости-код, код-ток и т. д.

Исследование выполнено при поддержке субсидий ГЗН по проекту на выполнение НИР № 8.6675.2017/БЧ.

## Список литературы

1. Лучинин В., Таиров Ю. Отечественный полупроводниковый карбид кремния: шаг к паритету // Современная электроника. 2009. № 7. С. 12–15.
2. Лучинин В., Таиров Ю. Карбид кремния алмазоподобный материал с управляемыми наноструктурно-зависимыми свойствами // Наноиндустрия. 2010. № 1. С. 36–40.
3. Полищук А. Полупроводниковые приборы на основе карбида кремния настоящее и будущее силовой электроники // Компоненты и технологии. 2004. № 8. С. 40–45.
4. Мокеров В.Г. Наногетероструктуры в сверхвысокочастотной полупроводниковой электронике. М.: Техносфера, 2010. 435 с.
5. Чувствительные элементы высокотемпературных датчиков давления. Материалы и технологии изготовления / П.Г. Михайлов [и др.] // Известия Южного федерального университета. Серия «Технические науки». 2014. № 4(153). С. 204–213.
6. Вопросы создания высокотемпературных датчиков механических величин. Материалы, конструкции, технологии / П.Г. Михайлов [и др.] // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2013. № 4. С. 61–70.
7. Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.
8. Блад П., Ортон Дж. В. Методы измерения электрических свойств полупроводников; пер. с англ. // Зарубежная радиоэлектроника. 1981. № 1. С. 3–50; № 2. С. 3–49.
9. Кучис Е.В. Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования. М.: Радио и связь, 1990. 264 с.
10. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах: учеб. для вузов / под ред. В.И. Нефедова. М.: Высшая школа, 2005. 535 с.

11. Фреик Д.М., Ткачук Р.З. Способ емкостных исследований полупроводников с высокой диэлектрической проницаемостью // Приборы и техника эксперимента. 1986. № 3. С. 207–208.
12. Базлов Н.В., Вывенко О.Ф., Тульев А.В. Универсальный емкостный спектрометр глубоких центров в полупроводниках и М.О.П. структурах // Приборы и техника эксперимента. 1987. № 3.
13. Фолкенберри Л. Применение операционных усилителей и линейных ИС; пер. с англ. М.: Мир, 1985. 572 с.
14. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники; пер. с англ. М.: Мир, 1998. 704 с.

## An automatic measuring system for investigation of semiconductor device structures

*Y.N. Gorelov, D.Y. Golubeva, L.V. Kurganskaya, A.V. Shcherbak*

The problems of development of an automatic measuring system for the study of semiconductor device structures parameters are considered. This system can be used both for experimental development of the technology for obtaining structures and for studies of the resistance of structures to various external factors, including factors of open space. A block diagram of the measuring system is proposed, which allows changing its configuration by software to increase the number of measured parameters. A block diagram of the measuring system is proposed. This system is able to change its configuration programmatically to increase the number of measured parameters. The scheme of measuring ports and units of measuring system switching is offered. In this scheme, all ports are identical, which makes it possible to connect samples with different topology and number of contacts to the system. The possible variants of the schemes of measuring units that implement voltage-code, capacitance-code, code-current, etc. are proposed.

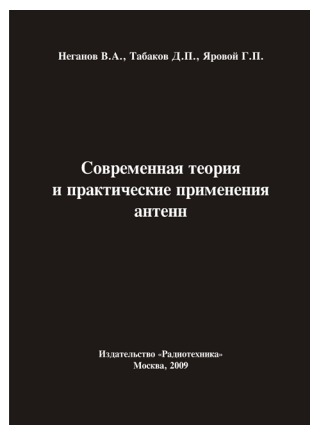
*Keywords:* device structure, electrophysical properties, automatic measuring systems.

**Неганов, В.А.**

**Современная теория и практические применения антенн:** монография / В.А. Неганов, Д.П. Табаков, Г.П. Яровой; предисл. акад. Ю.В. Гуляева; под ред. В.А. Неганова. – М.: Радиотехника, 2009. – 720 с.

**ISBN 978-5-88070-222-0**

УДК 621.396.67  
ББК 32.845



Рассмотрены основные разделы теории и техники антенн. Освещены вопросы расчета и построения различных типов антенн (от вибраторных до рупорных и антенных решеток, включая фазированные). Основное внимание уделено антеннам СВЧ и расчетам их электромагнитных полей в ближней зоне, т. е. вопросам электромагнитной совместимости.

Принципиальное отличие книги от известных заключается в последовательном применении метода физической регуляризации (самосогласованного метода) к расчету электромагнитного поля антенн, позволяющего осуществлять непрерывный переход с излучающей поверхности антенны к пространству вне ее. С помощью самосогласованного метода получены новые результаты по теории антенн: установлены связь между поверхностной плотностью тока на вибраторной антенне и напряженностью электромагнитного поля, однонаправленный режим излучения для кольцевой (рамочной антенны), режимы стоячих и бегущих волн в цилиндрической спиральной антенне, входное сопротивление практически для всех типов антенн. Теоретический материал подкреплен примерами применения многолучевых антенн.

*Предназначено для разработчиков антенно-фидерных устройств, аспирантов и докторантов, занимающихся вопросами проектирования антенных систем различного назначения, студентов радиотехнических специальностей высших учебных заведений.*