

ТӘЖІРИБЕЛІК АСПАПТАР МЕН ТЕХНИКА ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 537.39

Д.А.Афанасьев, Н.Х.Ибраев, Ж.Т.Исмаилов

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ЭФФЕКТА ХОЛЛА

Мақалада іске асырылған автоматтандырылған эксперименталдық қондырғының нәтижелері ұсынылған. Өлшеуіш құрылғы қалыңдығы 5 мм пластина және пленка тәрізді үлгілерді Холл эффектісін және бөлектенген кедергіні өлшеуге мүмкіндік береді. Өлшеу төрт зондылық әдісімен өткізілді. Заттың және қондырғының құрамы қарастырылған. Өлшеу жүйенің негізіне келесілер кірді: зерттеу затқа қосылатын тұрақтандырылған қоректендіру, зондтар қосылатын әр түрлі комбинациялық коммутация блогы, өзгеретін көбейткіш коэффициенті, өлшеу көбейткіш және компьютермен екі жаққа нәтижемен айырбастау қондырғының жұмысын басқару микроконтроллерлік блогы. Өлшеу LabVIEW программасы тілінде жазылды.

In the given work results of designing and manufacture of the automated experimental installation are presented. Installation allows to make measurements of specific resistance and effect of the Hall of film samples and plates in the thickness no more, than 5 mm. Measurements are made with the help 4-wire a measurement method. The device of installation and a design of the holder of samples is described. A basis of measuring system make: a source of the stabilised supply voltage submitted on studied the sample, the block of switching of various combinations of connection of probes, the measuring amplifier from variables in factor of strengthening and microcontroller block of management of work of installation with double-side data exchange with the personal computer. The software for carrying out of measurements is written in the environment of designing LabVIEW.

Современная электроника является высокотехнологичной областью промышленности и занимает передовое место в науке и технике. Такая роль обусловлена успешной разработкой сложных научно-технических проблем в области материаловедения и конструирования новых электронных компонентов. Большими возможностями для практического применения в области изготовления элементов электроники представляются в этом отношении пленки [1]. Однако использование пленочных материалов требует детального изучения их электрофизических характеристик. Измерение этих параметров требует специализированной измерительной аппаратуры. На сегодняшний день в исследованиях полупроводников нашли широкое применение зондовые методы измерения [2]. Из них четырёхзондовый метод измерения удельного сопротивления материалов является самым распространенным методом [3–5]. Основное преимущество его состоит в том, что не требуется создания омических контактов к образцу и возможно измерение удельного сопротивления образцов самой разнообразной формы и размеров. Условием для его применимости с точки зрения формы образца является наличие плоской поверхности, линейные размеры которой превосходят линейные размеры системы зондов.

В данной работе приведены результаты разработки автоматизированной измерительной установки для изучения электрофизических характеристик пленочных образцов. Установка позволяет проводить измерения удельного сопротивления и эффекта Холла пленочных образцов методом четырех зондов. Комплексное измерение удельного сопротивления и эффекта Холла позволяет определить такие важные параметры, как концентрация носителей заряда, подвижность и тип носителей заряда.

В состав установки входят следующие основные функциональные блоки (рис. 1):

- 1) держатель образца;
- 2) коммутатор зондов;

- 3) стабилизированный источник питания;
- 4) высокоточный измерительный усилитель напряжения;
- 5) измеритель температуры (Т);
- 6) блок управления, контролирующий работу всей установки с двухсторонней связью с персональным компьютером (ПК);
- 7) персональный компьютер.

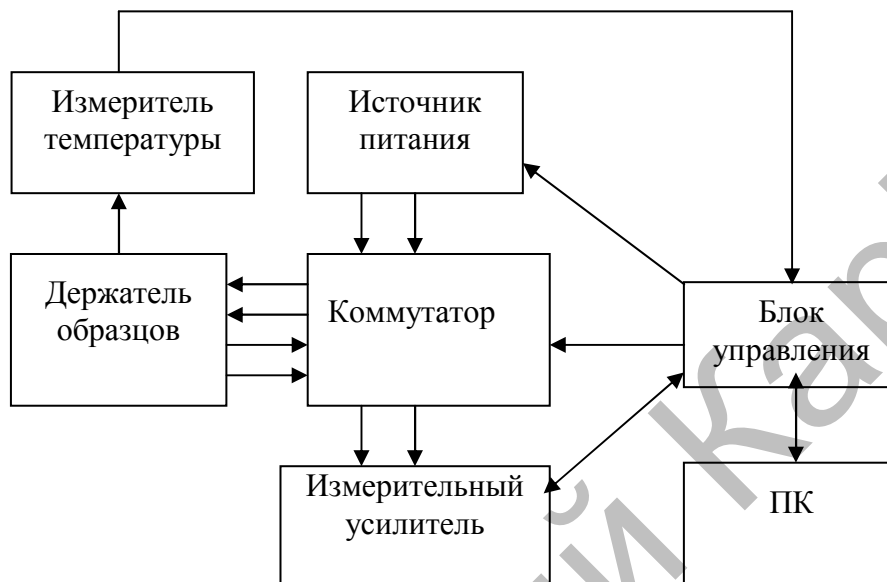


Рис. 1. Блок-схема измерительной установки

Сущность метода измерения заключается в следующем: четыре зонда располагаются по вершинам квадрата на предварительно подготовленной поверхности образца (рис. 2). Два зонда, образующих одну из сторон квадрата, при помощи коммутатора на герконовых реле через эталонное прецизионное сопротивление подключаются к стабилизированному источнику постоянного напряжения, вследствие чего через образец начинает протекать ток. Точное значение тока находят путём измерения падения напряжения на эталонном сопротивлении. Наименьший рабочий ток определяется возможностью измерений малых напряжений, наибольший рабочий ток ограничивается нагревом образца, что наиболее существенно для низкоомных образцов. Два других зонда посредством того же коммутатора соединяются с измерительным усилителем.

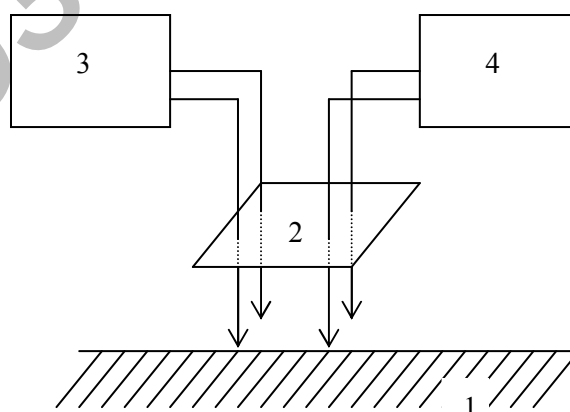


Рис. 2. Схема подключения устройств к зондам: 1 — поверхность исследуемого материала; 2 — измерительная головка с зондами; 3 — источник тока; 4 — измерительный усилитель

Зонды входят в состав держателя образца, выполненного в виде измерительной головки (рис. 3). Головка включает в себя корпус, к которому прикреплены четыре зонда. С корпусом соединяется электрическая поверхность, используемая для установки образцов, которая посредством кронштейна

механически приближается к корпусу. Расстояния между зондами строго фиксированы и составляют 1 мм. Зонды индивидуально прижимаются к поверхности с силой 2 Н. В качестве материала зондов используются твердые материалы и сплавы, химически не реагирующие с образцом. В данном случае был использован вольфрам. К измерительной головке прикреплен датчик для контроля температуры. При необходимости нагрева образца до 450 К можно воспользоваться резистивным нагревателем, встроенным в рабочую камеру. Для этого используется дополнительный внешний источник питания.

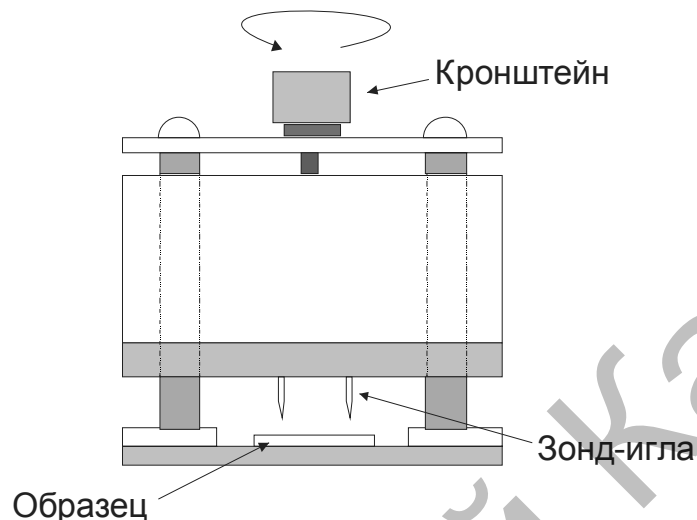


Рис. 3. Блок-схема измерительной головки

Назначение коммутатора — при помощи реле обеспечивать все необходимые для измерения варианты подключения источника питания и измерительного усилителя к зондам. Это происходит вследствие 8 измерений: при пропускании тока последовательно через каждую пару соседних зондов и изменения полярности приложенного напряжения. Последующее вычисление среднего значения удельного сопротивления осуществляется по результатам восьми измерений, что позволяет обеспечить снижение случайных ошибок в два раза. При измерении эффекта Холла источник питания и усилитель подключаются к двум диагоналям квадрата с изменением полярности приложенного напряжения. Конструктивно схему коммутатора составляют: герконовые реле РЭС 55А и микросхема ULN2003А. Выбор реле РЭС 55А обусловлен рядом факторов:

- миниатюрный корпус;
- замыкающие и размыкающие контакты имеют позолоченное напыление, соответственно наименьшую величину сопротивления соединения;
- небольшое значение напряжения срабатывания.

Микросхема ULN2003А — интегральная транзисторная ключевая сборка. Она позволяет управлять 7 реле при помощи входных сигналов ТТЛ уровня, при этом в микросхеме имеются диоды, которые осуществляют защиту управляющей катушки реле от индукционного тока, возникающего в ней.

При конструировании источника питания для четырехзондового метода измерения возник ряд трудностей. В качестве питания обычно используется стабилизированный источник тока, а измерение заключается в том, что на измеряемый образец подается ток и снимается напряжение с исследуемого образца. Однако сложно реализовать источник постоянного тока с высокой степенью стабильности величины тока, когда нагрузочное сопротивление меняется в больших пределах — от единиц Ом до МОм. Было принято решение заменить источник тока источником напряжения. Для реализации этого блока необходим источник напряжения с высокой степенью стабилизации и соответствующим нагрузочным током. Всем вышеперечисленным требованиям удовлетворяет микросхема REF02 фирмы Burr-Brown. Данная микросхема является прецизионным источником напряжения +5V, максимальная погрешность составляет $\pm 0,2\%$, высокая температурная стабильность не более 10^{-5} В/°С в температурном диапазоне (от -40 °С до $+85$ °С). Устройство построено следующим образом: к прецизионному источнику напряжения +5V последовательно подключается магазин высокоточных прецизионных сопротивлений и исследуемый материал, таким образом, образуется делитель напряжения. С высокоточного прецизионного сопротивления снимаются показания падения напряжения, который эквива-

лентен протекающему в данной цепи току. Магазин сопротивлений позволяет ограничивать ток в измерительной цепи в пределах от 1 мкА до 10 мкА и получить достаточную для измерения величину падения напряжения на них. Переключение резисторов магазина сопротивлений, аналогичного блоку коммутатора, происходит автоматически, при помощи реле РЭС 55А и микросхемы ULN2003А.

При измерении напряжения на образце необходимо усилить и преобразовать разность потенциалов между двумя точками образца, каждая из которых имеет ненулевой потенциал относительно общей точки измерительной схемы. Первичное преобразование и усиление производится при помощи измерительного усилителя, который представляет собой устройство с дифференциальными входами, на которых происходит усиление только разности напряжений, поданных на эти входы, и ослабляется синфазная составляющая напряжения. В литературе такие усилители часто называются инструментальными усилителями. Рассматриваемый усилитель содержит три операционных усилителя (ОУ) и десять резисторов, резистор $R2$ предназначен для изменения коэффициента усиления. Коэффициент усиления варьируется в пределах от 1 до 10 при помощи резисторов, подключаемых вместо резистора $R2$, посредством реле РЭС55А. В качестве ОУ взят К140УД17А — прецизионный усилитель с малым напряжением смещения, высоким входным сопротивлением и высоким коэффициентом усиления напряжения.

Для расширения диапазона выходного напряжения и согласования усилителя с АЦП блока управления (наименьшая погрешность оцифровки) был использован дополнительный усилитель с переменным коэффициентом усиления. Он собран по схеме неинвертирующего усилителя с переменным резистором, подключаемым к общей точке. В качестве ОУ выбрана микросхема К140 УД1408 с высоким входным сопротивлением и хорошей стабильностью электрических характеристик. Усилитель напряжения имеет два коэффициента усиления — 1 и 10, переключение положения коэффициента усиления осуществляется с помощью реле РЭС55А.

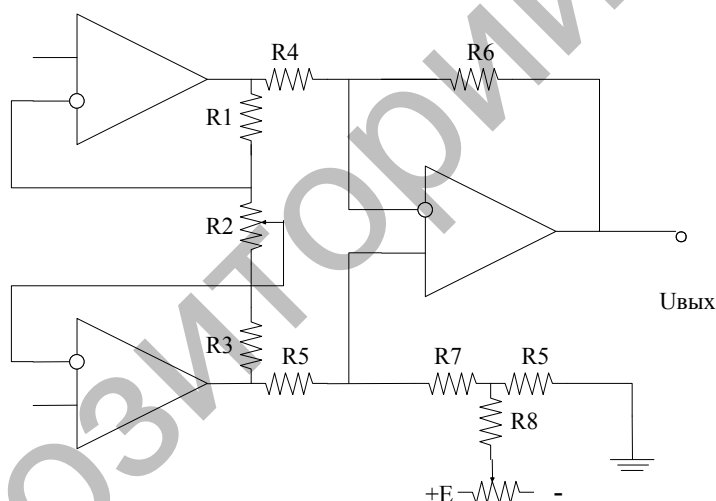


Рис. 4. Схема измерительного усилителя

Для реализации переключения реле РЭС55А, используемых в блоках источника питания и измерительного усилителя, используется вторая микросхема ULN2003А.

Измерение удельного сопротивления ВТСП образцов происходит при температуре в диапазоне от 77 К до 450 К. Для определения величины температуры используется полупроводниковый элемент. Термодатчик устанавливается в обратную связь операционного усилителя. Это позволяет повысить чувствительность полупроводникового элемента и получить однозначную зависимость напряжения на выходе усилителя от температуры. Сигнал от усилителя после АЦП поступает в ПК.

Блок управления контролирует работу коммутатора, обеспечивая измерение удельного сопротивления и измерение коэффициента Холла. Также с блока управления осуществляется регулирование значения тока на источнике и значения коэффициента усиления на измерительном усилителе. Помимо функций регулирования, блок управления осуществляет ещё и функцию передачи информации на ПК. Так, сигналы с измерительного усилителя и термодатчика поступают на АЦП, после чего происходит их оцифровка и передача на ПК. Но самым блоком управления, в свою очередь, управляет компьютер. Следовательно, при помощи данной системы можно реализовать либо в случае надоб-

ности изменить любой алгоритм измерения; следить за показаниями датчиков и управлять периферией в реальном времени; задать время того или иного измерения; выводить обработанную информацию в любом удобном виде (график, таблица, диаграмма и т.д.).

Основным элементом блока управления (БУ) является микроконтроллер PIC16F873A компании Microchip (рис. 5). Данное устройство содержит в себе разнообразные модули и имеет необходимые технические характеристики. Память программ контроллера сконструирована по Flash-технологии, что позволяет многократно ее перепрограммировать. PIC16F873A содержит встроенный модуль 10 разрядного АЦП, универсальный приёмопередатчик USART, необходимый для осуществления связи с компьютером по протоколу RS-232, а также 3 порта ввода-вывода, необходимых для управления периферией. Выходы с модуля USART микроконтроллера имеют TTL уровни, поэтому был собран преобразователь уровней TTL в уровни порта ПК — RS-232. Преобразователь основан на специализированной микросхеме MAX232 и имеет типичную схему включения. Преимущество данной микросхемы — простота включения, минимальная обвязка, однополярное питание 5В.

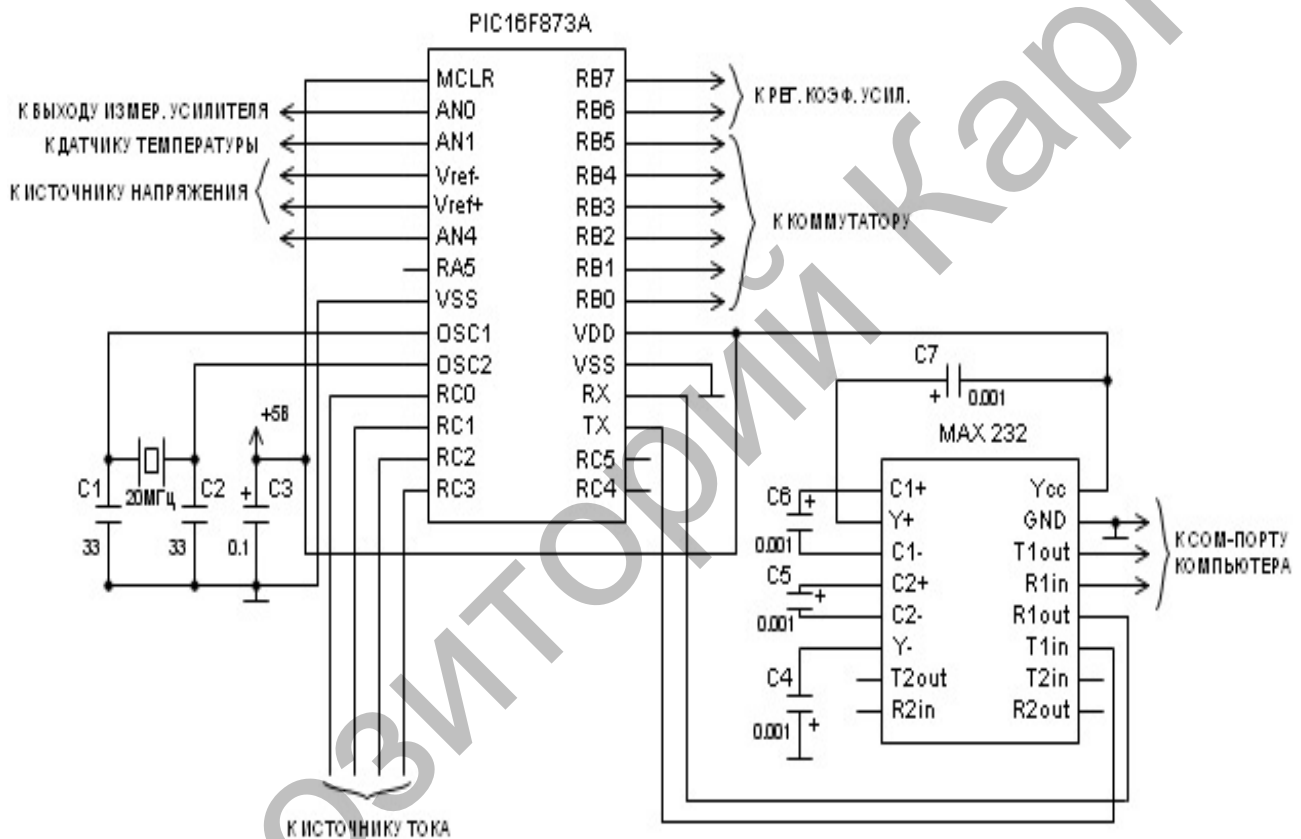


Рис. 5. Схема блока управления

Управление устройствами осуществляется при помощи передачи двух байт с компьютера. Первый байт является командой, а второй — операндом. Команд всего шесть:

- 1) коммутация зондов в необходимую позицию;
- 2) изменение значения коэффициента усиления на измерительном усилителе по напряжению;
- 3) изменение значения тока, протекающего через образец;
- 4) изменение полярности тока, протекающего через образец;
- 5) включение АЦП, оцифровка напряжения на образце и на термодаре, отправка информации о значениях напряжений в ПК;
- 6) выключение АЦП и прекращение оцифровки.

Первой команде соответствует код 1 в двоичной системе счисления, второй — 2 в той же системе и т.д., вплоть до шестой команды.

Возможных комбинаций соединения зондов всего шесть. В случае с первой командой операнд может иметь соответственно одно из шести возможных значений. Для второй команды общий коэффициент усиления двух каскадов усиления может принимать лишь следующие значения: 1, 10, 100.

Таким образом, операнд имеет 3 значения. Ток может принимать четыре значения, следовательно, вместе с третьей командой может быть передан операнд, имеющий одно из четырёх возможных значений. Полярность может быть либо прямой, либо обратной и возможных значений операнда в случае с четвёртой командой всего два. Последние две команды не несут информации в операндах.

На персональный компьютер осуществляется передача данных с датчика температуры и измерительного усилителя. Передача происходит следующим образом. Сигнал с измеряемого источника подаётся на АЦП, где происходит его оцифровка и передача в ПК результата преобразования в виде двух байтов. В компьютере осуществляется обработка переданной информации в соответствии с программой.

Посредством блока управления осуществляется управление тремя устройствами по тринадцати линиям. Управление блоком коммутатора осуществляется при помощи задания на выходах RB0–RB5 порта В микроконтроллера определённой последовательности логических уровней (рис. 5), соответствующей конкретному положению зондов. С выводов RB0–RB5 сигналы подаются на реле коммутатора и задают на всех реле одну из двух возможных позиций геркона. Также с порта В осуществляется задание коэффициента усиления на измерительном усилителе и дополнительном усилителе. Для этого используются выводы микроконтроллера RB6 и RB7 соответственно. Блок источника тока управляется с порта С. Для этого задействованы выводы RC0–RC3. Посредством управления тремя реле по трём линиям задаётся одно из четырёх возможных значений тока. И ещё одно реле, необходимое для переключения полярности на источнике тока, управляется с одного оставшегося вывода.

Программа работы микроконтроллера написана в интегрированной среде разработки MPLAB IDE, поставляемой производителем контроллеров семейства PIC-micro фирмы Microchip Technology Incorporated. Программное обеспечение для работы ПК написано в графической среде проектирования LabVIEW, выпускаемой фирмой National Instruments. LabVIEW обладает удобным пользовательским интерфейсом.

Использование системы измерения, составной частью которой является ПК, работающей совместно с блоком управления на базе микроконтроллера, позволяет упростить работу исследователя, повышает производительность процесса измерения, а также повышает точность измерения в связи с возможностью применения статистических методов обработки экспериментальных данных. Кроме того, данная система обладает гибкостью, являющейся результатом применения перепрограммируемого микроконтроллера. В случае необходимости, путём внесения изменений в программу контроллера можно изменить работу системы в целом.

После сборки измерительной установки производилась проверка точности измерения. В качестве эталонных сопротивлений был выбран ряд прецизионных сопротивлений P331 (10 Ом, 100 Ом, 1 кОм, 10 кОм) с номинальным током $I = 0,0032$ А и классом точности 0,01. Данные эталонные сопротивления включались в измерительный канал вместо исследуемого образца. По результатам измерений определялось среднее значение и дисперсия величины. Используя критерий Стьюдента, находилась ошибка измерения. Результаты проверки показали, что наибольшая погрешность измерений удельного сопротивления в данном интервале составляет не более 3 %.

Список литературы

1. *Борисенко А.И., Новиков В.В., Прихидько Н.Е., и др.* Тонкие неорганические пленки в микроэлектронике. — Л.: Наука, 1972. — 112 с.
2. *Самойло А.С., Шиманский А.Ф., Кирик С.Д.* Зависимость электропроводности двойных оксидов висмута-лантана и висмута-эрбия от парциального давления кислорода // Вестник Красноярского гос. ун-та. Естеств. науки. — 2006. — № 2. — С. 97–99.
3. *Павлов Л.И.* Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. — М.: Высш. шк., 1987. — 239 с.
4. *Бублик В.Т., Дубровина А.Н.* Методы исследования структуры полупроводников и металлов. — М.: Высш. шк., 1987. — 272 с.
5. *Шалимова К.В.* Физика полупроводников. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 392 с.
6. *Фистуль В.И.* Введение в физику полупроводников. — М.: Высш. шк., 1984. — 352 с.