

Цифровое устройство для измерения поверхностного сопротивления четырёхзондовым методом

Д. А. Коновалов, В. И. Нуждин, А. Л. Степанов

Лаборатория физического приборостроения, лаборатория радиационной физики, группа нанооптики и наноплазмоники

Спроектирована и создана цифровая измерительная система для определения поверхностного сопротивления различных материалов четырёхзондовым методом, построенная на базе персонального компьютера, внешнего программно-управляемого источника-измерителя, а также промышленной зондовой головки. Разработано соответствующее программное обеспечение для управления, сбора, обработки и визуального представления накопленной информации. Работа системы продемонстрирована на оценках поверхностного сопротивления слоёв пористого германия, сформированных имплантацией ионами серебра при различных значениях температуры облучаемой подложки монокристаллического германия.

Введение

При изучении свойств поверхности различных тонкоплёночных материалов, в частности сформированных при ионной имплантации [1], одними из ключевых параметров характеризации электропроводности являются их поверхностное электрическое (R) и удельное (ρ) сопротивление. Данные величины отражают отклик подвижных заряженных носителей на внешнее приложенное электрическое поле. На практике для определения R и ρ применяется четырёхзондовый метод с использованием соответствующего измерительного устройства [2]. Ранее в работе [3] была предложена, разработана и изготовлена оригинальная установка для определения электрофизических характеристик тонкоплёночных образцов четырёхзондовым методом с использованием стандартизированной зондовой головки, обеспечивающая высокую точность измерений. При этом значения R и ρ на данной установке можно рассчитать только вручную по экспериментальным значениям напряжения (U) и тока (J), отображаемым на соответствующих индикаторах. Кроме того, светоизолирующая конструкция узла зондовой головки затрудняет точное позиционирование образцов на крепёжном столике относительно измерительных зондов.

Для автоматизации процесса измерения U и J было разработано новое цифровое измерительное устройство на современной элементной базе, работающее под управлением оригинального специализированного программного обеспечения. На базе нового цифрового устройства, персонального компьютера, промышленной зондовой головки была создана новая цифровая измерительная система (ЦИС) для определения R и ρ четырёхзондовым методом. Дополнительно, для облегчения позиционирования образца в узел зондовой головки был интегрирован оптический USB-эндоскоп, для вывода и сохранения изображения на персональный компьютер.

При конструировании устройств автоматизации измерений физических величин широко применяются специализированные микросхемы. В настоящее время производители выпускают большой ассортимент подобных микросхем, отличающихся разрядностью аналого-цифровых преобразователей (АЦП), быстродействием и количеством дополнительных интегрированных цифровых и аналоговых узлов. Одной из таких микросхем, отличающихся высокой степенью интеграции, является микросхема ADS1220 компании Texas Instruments (USA). При относительно невысокой коммерческой стоимости, в ней содержатся узлы, необходимые для осуществления высокоточных физических измерений такие, как 24-х разрядный сигма-дельта АЦП, аналоговые коммутаторы, программируемый масштабный усилитель, источник опорного напряжения и два программируемых источника тока.

В настоящей работе показано, как на основе специализированной микросхемы ADS1220 можно изготовить устройство для ЦИС – программно-управляемый источник-измеритель U и J для определения R и ρ четырёхзондовым методом.

Программно-управляемый источник-измеритель

Структурная схема созданного устройства приведена на рис. 1. Программируемый контроллер Arduino Nano осуществляет низкоуровневое взаимодействие по шине SPI с микросхемой ADS1220 и обеспечивает внешний доступ к её ресурсам по протоколу RS232 через порт USB. Контакты 1, 2, 3, 4 измерительной зондовой головки располагаются вдоль прямой линии на поверхности образца. Программируемые источники J IDAC1, IDAC2 микросхемы ADS1220 через сопротивление R_I и выводы REFP, REFN подключаются к токовым контактам (1, 4) зондовой головки. Входы AIN2, AIN3 образуют канал измерения напряжения на потенциальных контактах (2,

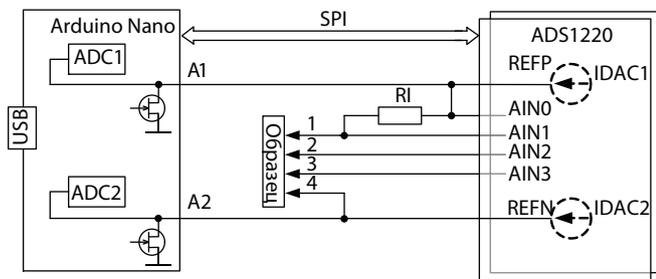


Рис. 1. Структурная схема разработанного источника-измерителя.

3) зондовой головки. Входы AIN0, AIN1 образуют канал измерения тока J , протекающего через токовые контакты (1, 4) зондовой головки. Величина J вычисляется по падению U , измеренному на сопротивлении R_1 . Изменение направления J через зондовые контакты 1, 4 осуществляется по мостовой схеме путём подсоединения одного из этих контактов к общему проводу. Для упрощения и удешевления конструкции устройства в качестве нижних ключей моста использованы внутренние полевые транзисторы выводов A1 и A2 программируемого контроллера. С помощью АЦП микроконтроллера, использующего аналоговые каналы ADC1 и ADC2, осуществляется контроль режима работы источников J IDAC1, IDAC2. Если источник J находится в режиме стабилизации, то U на его выходе не превышает 2.2 В.

Печатная плата разработанного устройства, показанная на рис. 2, была разработана в программной среде системы проектирования DipTrace и имеет размер 42×46 мм. Корпус устройства, спроектированный по принципу “спичечного коробка”, распечатан на 3d-принтере и состоит из двух частей: внутреннего шасси и внешнего кожуха. На рис. 3 показано устройство со снятым внешним кожухом и присоединённым имитатором

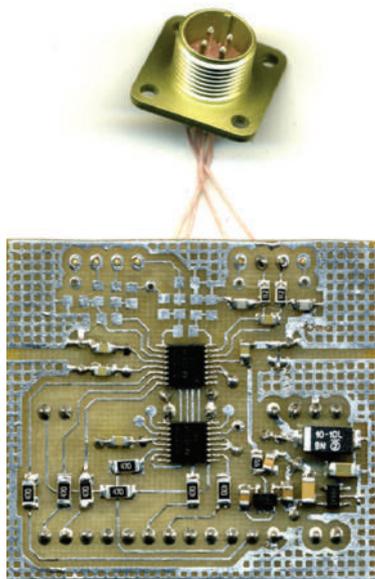


Рис. 2. Печатная плата разработанного устройства.

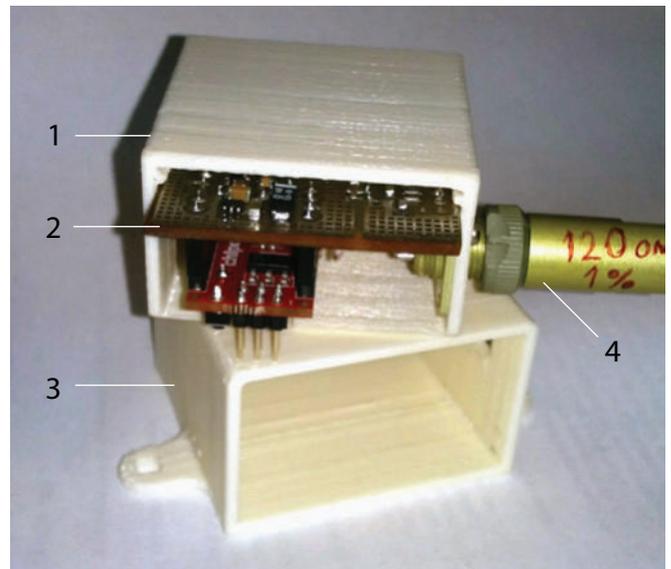


Рис. 3. Разработанное устройство со снятым внешним кожухом и присоединённым имитатором образца: 1 - внутреннее шасси, 2 - печатная плата устройства, 3 - внешний кожух с фланцами крепления, 4 - имитатор образца.

тором образца. Фланцы крепления корпуса устройства рассчитаны для крепления на платформу промышленного оптического микроскопа Микромед МС2, на базе которой собран узел перемещения четырёхзондовой головки. В корпус узла её крепления был интегрирован оптический USB-эндоскоп, оснащённый светодиодной

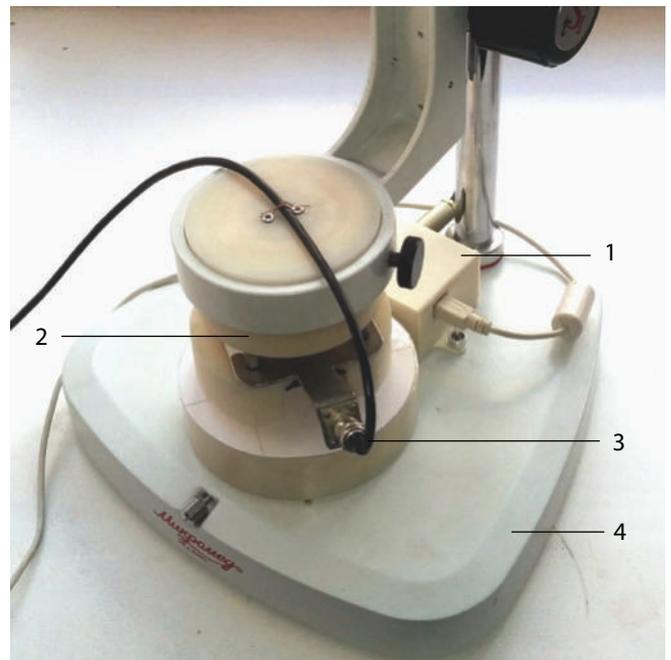


Рис. 4. Конструкция внешних узлов, входящих в состав ЦИС, в сборе: 1 – разработанное цифровое устройство в корпусе; 2 – корпус узла крепления промышленной четырёхзондовой головки; 3 – USB-эндоскоп; 4 – платформа оптического микроскопа Микромед МС2.

подсветкой, что помогает осуществлять позиционирование тонкоплёночных образцов и архивную фотофиксацию положения зондов на анализируемой поверхности при контроле на мониторе персонального компьютера. На рис. 4 приведена фотография готовой конструкции внешних узлов, входящих в состав ЦИС, подключаемых к персональному компьютеру.

Программное обеспечение ЦИС

Для функционирования ЦИС были разработаны специальное программное обеспечение (СПО) и прикладное программное обеспечение (ППО).

СПО управляет работой модуля микроконтроллера разработанного источника-измерителя и обеспечивает выполнение следующих функций:

- приём и обработку управляющих директив по последовательному интерфейсу USB по протоколу RS-232;
- управление микросхемой ADS1220;
- предварительную цифровую обработку данных, поступающих от измерительных каналов – накопление с усреднением без экстремальных значений, конвертирование отсчётов АЦП в напряжение (мВ) с учётом коэффициента усиления и т.п.;
- передачу данных по запросу от ППО.

СПО создано и загружено в микроконтроллер в программной среде разработки Arduino. Набор управляющих директив, обрабатываемых СПО, позволяет управлять как отдельными узлами ADS1220, например, переключать каналы коммутатора входа, так и осуществлять последовательности действий по полному циклу измерений. В частности, средствами СПО в разработанном устройстве была реализована автоматическая коррекция постоянного смещения масштабного усилителя микросхемы ADS1220.

ППО, созданное в среде разработки LabView, выполняется на компьютере, работающем под управлением операционной системы Windows, и предназначено для сбора, окончательной обработки, визуализации и сохранения результатов измерения.

На рис. 5 представлена панель управления ППО на мониторе персонального компьютера. После запуска программы на выполнение в поле PictureBox в реальном масштабе времени транслируется изображение положения образца и зондов головки с видеокamеры эндоскопа (рис. 5, слева), а на индикаторы панели управления ППО в бесконечном цикле выводятся результаты измерений (рис. 5, справа).

При нажатии на экранную кнопку “Append Result” в генерируемую таблицу добавляется строка с названием образца “Label” и результатами измерений. Одновременно происходит сохранение кадра из поля “PictureBox” в графический файл. Окончание серии измерений завершается нажатием на кнопку “STOP&SAVE”. Затем в появляющемся диалоговом окне будет предложено ввести или выбрать имя файла для сохранения таблицы в текстовом виде.

После завершения монтажных и отладочных работ с помощью специальной версии ППО и набора имитаторов образца были определены основные технические характеристики измерительных каналов разработанного устройства.

Технические характеристики разработанного устройства

- Тип каналов измерения: дифференциальный;
- чувствительность канала измерения U : 0.1 мкВ;
- диапазон предельного измеряемого U : ± 2 В;

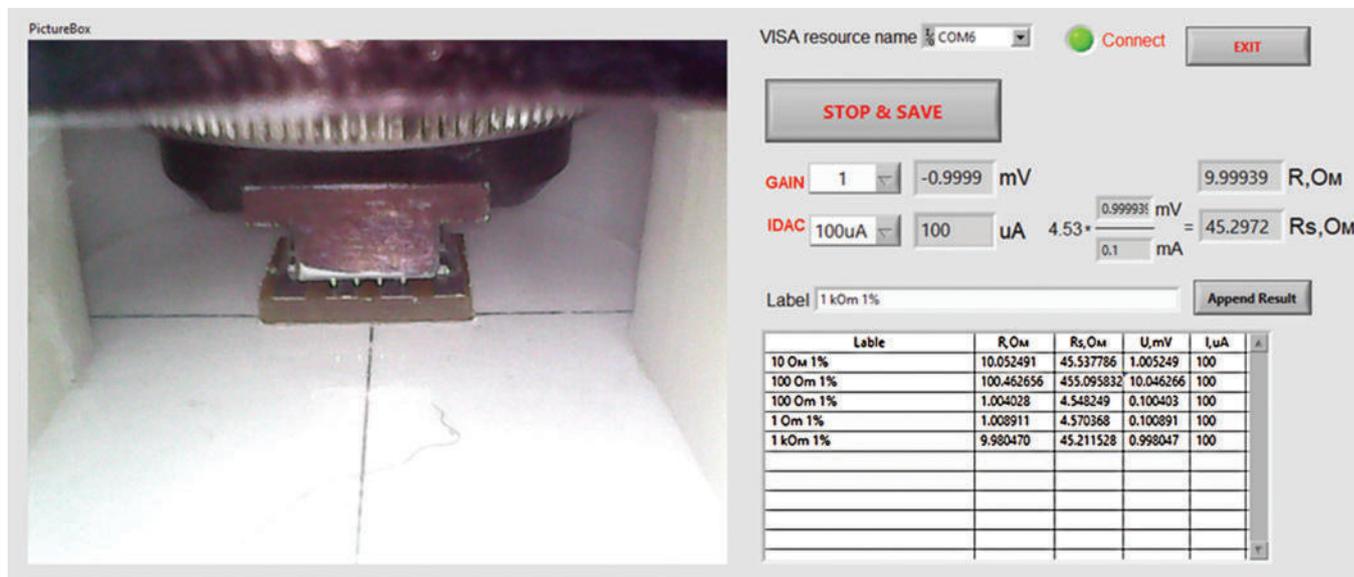


Рис. 5. Панель управления ППО.

- диапазон установки источников J : 10–1500 мкА;
- точность установки J : 1%;
- чувствительность канала измерения J : 10 нА;
- время измерения одной точки: 3 секунды;
- питание: по кабелю USB.

Экспериментальная апробация разработанного устройства

Для проверки функционирования цифрового устройства для измерения поверхностного сопротивления четырёхзондовым методом были использованы образцы пористого германия (PGe), сформированные имплантацией ионами $^{108}\text{Ag}^+$ с энергией 30 кэВ, дозе $1.3 \cdot 10^{16}$ ион/см² и плотности тока в ионном пучке 5 мкА/см² при различных значениях температуры облучаемой монокристаллической подложки *c*-Ge от 25 до 400°С. Дополнительные детали формирования образцов при ионной имплантации подробно описаны в сообщении данного сборника [4]. Электропроводность поверхностей образцов Ge (подвергнутой имплантации ионами Ag^+ , и обратной стороны) характеризовалась сопротивлением R , измеряемым четырёхзондовым методом при комнатной температуре. Типичные изображения образцов, наблюдаемых на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Merlin (Carl Zeiss) приведены на рис. 6.

По результатам измерений была построена диаграмма (рис. 7) зависимости R от температуры подложки при ионной имплантации.

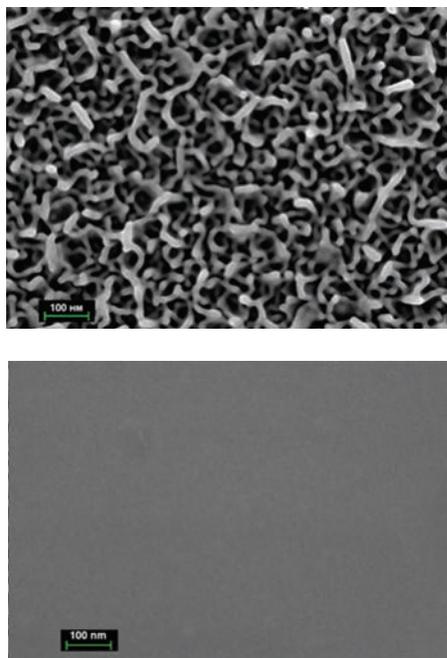


Рис. 6. Типичные СЭМ-изображения имплантированной (верх) и обратной (низ) поверхностей образца Ag:PGe

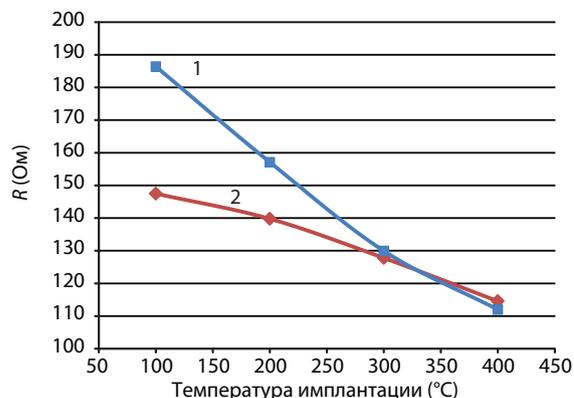


Рис. 7. Зависимость R имплантированной (1) и обратной (2) поверхностей образцов Ag:PGe от температуры подложки.

Заключение

Решена задача упрощения процедуры и автоматизации измерений R четырёхзондовым методом, поставленная во введении данной работы. Определены основные технические характеристики разработанного цифрового устройства. Работа устройства продемонстрирована на примере измерений R , выполненных на поверхностях подложек *c*-PGe и Ag:PGe.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования РФ.

Литература

1. Stepanov A.L.: Ion Implantation Synthesis and Optics of Metal Nanoparticles. Mauritius: Lambert Acad. Publ. 2018. 426 p.
2. Поклонский Н.А., Белявский С.С., Вырко С.А., Лапчук Т.М.: Четырёхзондовый метод измерения электрического сопротивления полупроводниковых материалов. Минск: Белгосуниверситет 1998. 46 с.
3. Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Коновалов Д.А., Степанов А.Л.: Устройство для определения электрофизических характеристик образцов четырёхзондовым методом. КФТИ им. Е.К. Завойского 2018. Ежегодник, С. 90–92. Казань: ФИЦ КазНЦ РАН, 2019.
4. Степанов А.Л., Хантимеров С.М., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Рогов А.М., Коновалов Д.А., Гаврилова Т.Г.: КФТИ им. Е.К. Завойского. Ежегодник 21, 97–103 (2022)