

Цифровой USB прибор для измерения вольт-амперных характеристик

Д. А. Коновалов, В. И. Нуждин, В. Ф. Валеев, А. М. Рогов, А. Л. Степанов

Лаборатория физического приборостроения, Отдел когерентной и нелинейной оптики, Группа нанооптики и наноплазмоники

Спроектирована и изготовлена автоматизированная установка для измерения вольт-амперных характеристик, состоящая из цифрового USB прибора, созданного по оригинальной электронной схеме, и компьютера, работающего под управлением разработанного прикладного программного обеспечения. Описан цифровой USB прибор. Работа установки продемонстрирована на примерах измерений, выполненных на образцах пористого германия. Приведены вольт-амперные характеристики тонкоплёночных слоёв германия, сформированных имплантацией ионами серебра при различных дозах облучения.

На сегодняшний день ионная имплантация является одной из доминирующих технологий в электронной промышленности, используемой для контролируемого легирования активными примесями различных полупроводниковых материалов [1]. Ключевым параметром характеризации электропроводящих свойств тонкоплёночных допированных примесью полупроводников является их вольт-амперная характеристика (ВАХ). Данная характеристика определяет зависимость тока, протекающего через объект исследования (например, полупроводниковая пластина), от приложенного к нему напряжения. Чаще всего на практике рассматривают ВАХ нелинейных объектов (степень нелинейности определяется коэффициентом нелинейности), поскольку для линейных объектов ВАХ представляет собой прямую линию, определяемую законом Ома. В частности, полупроводниковые структуры различного химического состава с p-n переходом или с барьером Шоттки обладают нелинейной ВАХ.

Относительно недавно в работе [2] была представлена разработка установки для измерения ВАХ. Было показано, что достоинствами данной установки являются используемые в ней достаточно широкие рабочие диапазоны напряжения и тока (0–60 В и 0–2 А), а также возможность работы в ручном режиме без подключения к компьютеру. Однако при эксплуатации установки был выявлен ряд недостатков таких как низкие быстродействие, разрешающая способность и дискретность установки тока и напряжения, а также невозможность определения отрицательного тока при положительном напряжении на образце (например, в случае освещённого фотодиода). Поэтому возникла задача по разработке новой установки с учётом выявленных недостатков.

В результате проведённой работы была создана автоматизированная установка с биполярными измерительными каналами, с более высоким быстродействием, а также повышенной дискретностью установки тока и напряжения и повышенной разрешающей способностью.

Созданная установка относится к классу виртуальных цифровых приборов, её внешний вид приведён на рис. 1. Установка состоит из физического прибора – программно-

управляемого источника-измерителя, а так же компьютера, работающего под управлением оригинального прикладного программного обеспечения реализующего средства управления и логику работы прибора.

Эффективность новой ВАХ установки для её применения на практике обеспечивается следующими техническими параметрами:

- возможность проведения измерений;
- диапазон установки тока: $-40 \text{ mA} \dots +40 \text{ mA}$;
- дискретность установки тока: 0.1 mA ;
- диапазон рабочего напряжения: $-20 \text{ V} \dots +20 \text{ V}$;

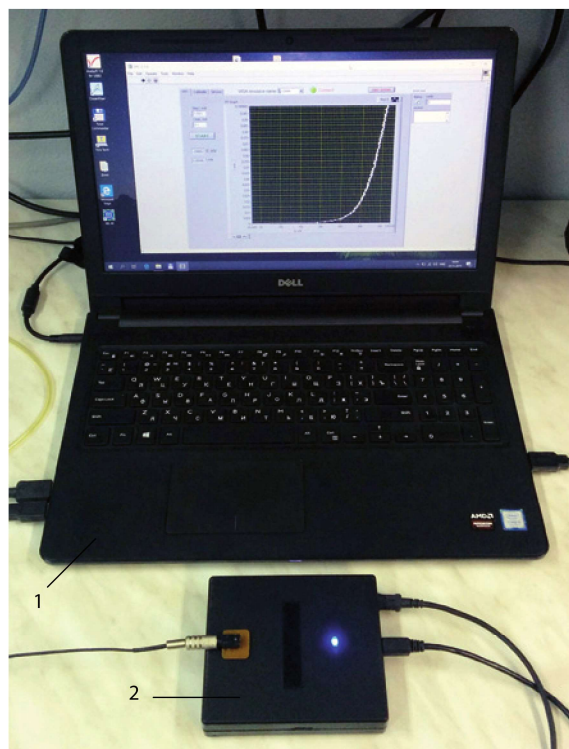


Рис. 1. Внешний вид новой компьютеризированной установки по измерению ВАХ: 1 – компьютер, 2 – программно-управляемый источник-измеритель.

- дискретность установки напряжения: 50 мкВ;
- точность измерения тока и напряжения: 1%;
- разрешение измерения тока: 0.5 мкА (скорость преобразования 20 SPS);
- разрешение измерения напряжения: 40 мкВ (скорость преобразования 20 SPS);
- время измерения одной точки (установка тока + измерение напряжения и тока): 50 мс (скорость преобразования 175 SPS и более);
- питание: постоянное напряжение 5 В, 500 мА;
- габариты источника-измерителя: 122×102×25 мм.

На рис. 2 представлена блок-схема сконструированного физического прибора – программно управляемого источника-измерителя. В состав источника-измерителя входит источник тока, управляемый напряжением (ИТУН), модуль аналого-цифрового преобразователя (АЦП), модуль микроконтроллера (МК), модуль цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), два оптронных ключа (P1 и P2) и стандартный повышающий биполярный преобразователь напряжения (не показан). На блок-схеме полупроводниковый объект исследования выделен штриховой линией и показан условным обозначением диода D. Напряжение, падающее на измерительном сопротивлении R, пропорционально протекающему по цепи D-R току. К точке соединения D и R подключены вход обратной связи ОС ИТУН и вход 2 модуля АЦП – канал измерения тока. Вход 1 и вход 2 модуля АЦП образуют дифференциальный канал измерения напряжения. При замыкании оптронного ключа P2 напряжение с выхода модуля ЦАП прикладывается к объекту исследования. При замыкании оптронного ключа P1 выход ИТУН подключается к объекту исследования, а напряжение с выхода модуля ЦАП используется для задания выходного тока ИТУН. Одновременное замыкание ключей P1 и P2 запрещено на уровне прошивки МК. ИТУН выполнен по классической схеме источника тока с незаземлённой нагрузкой на базе электрометрического усилителя.

В модуле АЦП применена микросхема ADS1220 – 4-х канальный 24-битный дельта-сигма преобразователь с масштабным усилителем. Кроме того, микросхема ADS1220 содержит два программируемых источника тока. Точность установки тока ±1%. Каждый источник тока может быть подключён к любому аналоговому входу АЦП. Эта возможность используется при калибровке прибора для определения точного значения измеритель-

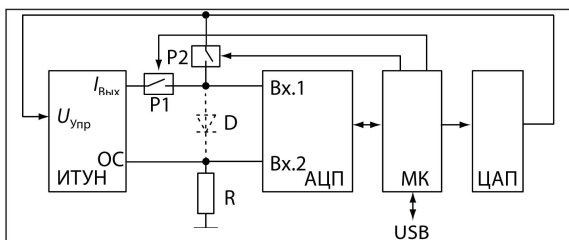


Рис. 2. Блок-схема сконструированного программно-управляемого источника-измерителя.

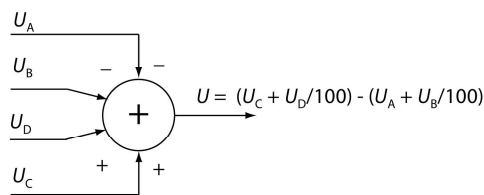


Рис. 3. Функциональная схема формирования напряжения в модуле ЦАП.

ного сопротивления R. Калибровка производится перед каждым циклом построения ВАХ. Поэтому требования к точности и температурной стабильности этого сопротивления очень низкие.

В качестве управляющего контроллера МК применён промышленный модуль Iskra Nano Pro (Arduino Nano), работающий под управлением оригинального специального программного обеспечения, реализованного как прошивка. Он обеспечивает следующие функции:

- приём и обработку управляющих директив по последовательному интерфейсу по протоколу RS-232;
- управление модулями ЦАП, АЦП и оптронными ключами P1, P2;
- предварительную цифровую обработку данных, поступающих от измерительных каналов – накопление с усреднением без экстремальных значений, конвертирование отсчётов АЦП в напряжение (мВ) с учётом коэффициента усиления;
- передачу данных в рабочую станцию с прикладным программным обеспечением.

Особенностью модуля ЦАП является техническое решение, позволяющее использовать 4-х канальную микросхему ЦАП MAX5815 с низкой дискретностью, для формирования напряжения с более высокой дискретностью. Структурно модуль ЦАП состоит из четырёх независимых каналов (A, B, C, D) формирующих однополярные напряжения и сумматора-вычитателя напряжений на базе операционного усилителя (рис. 3). Вес выходных напряжений каналов B и D (U_B и U_D) при суммировании/вычитании составляет 1/100 от веса каналов A и C (U_A и U_C). Комбинируя выходные однополярные напряжения 4-х каналов ЦАП, имеющих дискретность 12 бит, можно сформировать биполярное напряжение U с дискретностью ~19.5 бит.

Прикладное программное обеспечение, реализующее логику работы прибора и интерфейс оператора, взаимодействует с USB прибором по последовательному интерфейсу по протоколу RS-232. Скорость передачи данных 115200 бит/с. Интерпретатор команд интерфейса связи реализован в виде текстового консольного интерфейса. Список основных команд:

DAC n DDDD – для канала ЦАП n задаёт значение DDDD;

DAC_CLR – загрузка нулевого кода в регистры всех каналов ЦАП;

GAIN n – задаёт коэффициент усиления масштабного усилителя АЦП;

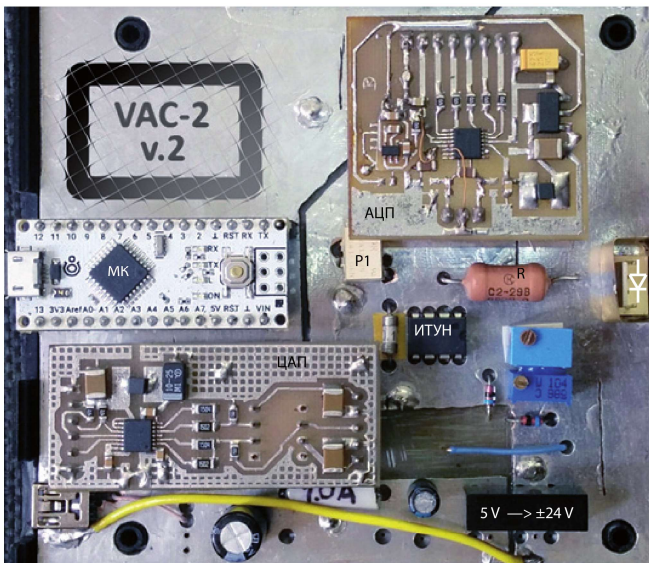


Рис. 4. Монтажная плата источника-измерителя с установленными модулями.

MUX n – конфигурирует входной коммутатор АЦП;
IDAC n – конфигурирует встроенные в АЦП источники тока;

DATA? – ждёт окончания преобразования АЦП и выводит результат в мВ с точностью 6 знаков после запятой;
OUT n – управляет оптронными ключами.

Полный список команд, их синтаксис и допустимые параметры приведены в соответствующем документе, входящем в комплект эксплуатационной и технической документации к прибору. Комплект эксплуатационной и технической документации состоит из четырёх документов и включает инструкцию по эксплуатации, техническое описание и описания специального и прикладного программного обеспечения.

На рис. 4 представлено изображение источника-измерителя без корпуса.

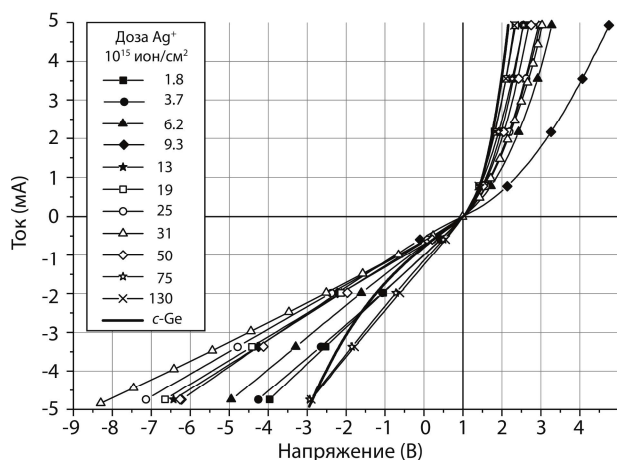


Рис. 5. ВАХ образцов c -Ge до и после имплантации различными дозами ионов серебра с энергией 30 кэВ. На вставке приведены значения ионных доз.

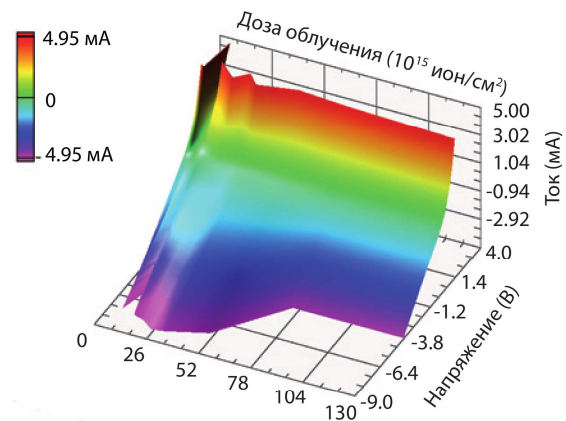


Рис. 6. Семейство ВАХ образцов c -Ge, имплантированных различными дозами ионов серебра (рис. 5), представленное в 3-х мерном виде.

Апробирование ВАХ установки проводилось на образцах подложек германия толщиной 150 мкм, имплантированных различными дозами ионов серебра в диапазоне $D = 1.8 \cdot 10^{15} - 1.3 \cdot 10^{17}$ ион/см² [1]. На рис. 5 представлены ВАХ образцов c -Ge до и после имплантации ионами серебра.

На рис. 6 семейство ВАХ образцов c -Ge, имплантированных различными дозами ионов серебра, представлено в виде трёхмерной поверхности.

Перед определением ВАХ на всех образцах было измерено поверхностное сопротивление с помощью устройства для определения электрофизических характеристик образцов четырёхзондовым методом [2]. Результаты измерения представлены на рис. 7. Видно, что между графиком на рис. 7 и поверхностью на рис. 6 наблюдается чёткая корреляция: на дозовой зависимости значений электрических параметров присутствуют экстремумы (провал и максимумы), соответствующие дозам $6.2 \cdot 10^{15}$, $9.3 \cdot 10^{15}$ и $1.9 \cdot 10^{16}$ ион/см².

Исследование на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) показало, что с ростом дозы облучения D

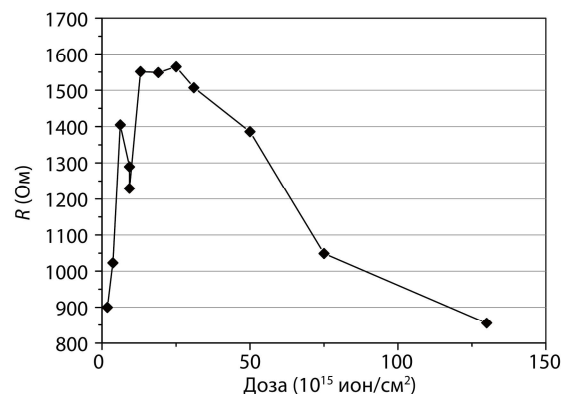
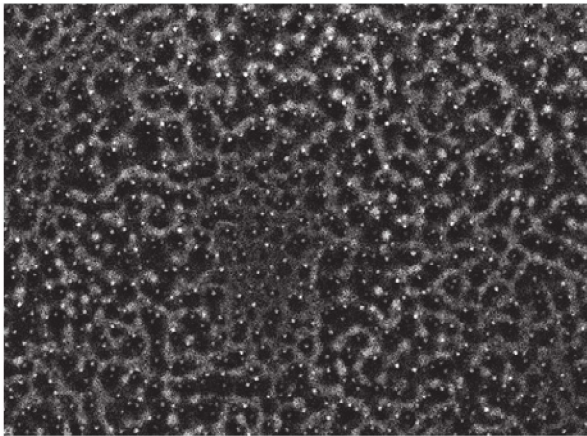
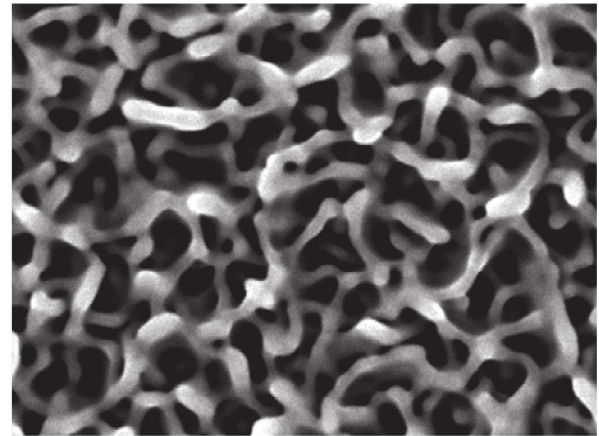


Рис. 7. Зависимость поверхностного сопротивления образцов c -Ge, имплантированных различными дозами ионов серебра с энергией 30 кэВ. Измерения 4-х зондовым методом.



а



б

Рис. 8. СЭМ-изображения поверхностей образцов Ag:PGe, сформированных имплантацией *c*-Ge ионами Ag⁺ при различных *D*: **а** $9.3 \cdot 10^{15}$ ион/см²; **б** $1.9 \cdot 10^{16}$ ион/см².

морфология поверхности образцов существенно изменяется [1]. На рис. 8 приведены СЭМ-изображения поверхностей образцов пористого германия Ag:PGe, сформированных при дозах $9.3 \cdot 10^{15}$ ион/см² (рис. 8а) и $1.9 \cdot 10^{16}$ ион/см² (рис. 8б). Наименьшая из рассмотренных доз (рис. 8а) соответствует пороговому значению, при достижении которой происходит образование наночастиц Ag в облучённом Ge. Наличие металлических наночастиц на СЭМ-изображении прослеживается в виде сферических белых пятен более плотного вещества металла Ag по сравнению с тёмным цветом слегка структурированной поверхности Ge. Наночастицы распределены равномерно по поверхности образца, их размер достаточно мал и составляет ~2–5 нм. При этом поверхность имплантированного Ge перестаёт быть гладкой, по площади образца прослеживается образование вспученной холмистой лабиринтной структуры (PGe) высотой около 5 нм относительно уровня поверхности зеркально-гладкой исходной подложки *c*-Ge.

При увеличении дозы при имплантации картина морфологии поверхности Ag:PGe заметно изменяется – образуется губчатая пористая структура (рис. 8б). Поры выглядят в виде переплетающихся нанонитей аморфного Ge толщиной в несколько десятков нанометров. При исследовании дозовой зависимости установлено, что пороговое значение образования губчатого слоя PGe происходит при дозе $1.9 \cdot 10^{16}$ ион/см². С дальнейшим ростом дозы структура PGe остаётся губчатой [1].

Выводы

Разработана и создана новая установка для измерения ВАХ тонкоплёночных материалов, которая может быть использована на практике в научных исследованиях и учебных процессах. Работа устройства продемонстрирована на примере измерений, выполненных на образцах пористого германия: получены вольт-амперные характеристики тонкоплёночных слоёв, имплантированных ионами серебра при различных дозах облучения. При обработке результатов измерений обнаружена корреляция зависимости электрофизических свойств и морфологии поверхности образцов пористого германия от дозы имплантации.

Работа выполнена совместно лабораторией физического приборостроения и группой нанооптики и наноплазмоники в рамках задач и при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект №17-12-01176 “Формирование слоёв пористого кремния и германия с металлическими наночастицами методом ионной имплантации”, рук. А. Л. Степанов.

Литература

1. Степанов А.Л., Нуждин В.И., Рогов А.М., Воробьёв В.В.: Формирование слоёв пористого кремния и германия с металлическими наночастицами. Казань: ФИЦ КазНЦ РАН, 2019.
2. Коновалов Д.А., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Степанов А.Л.: Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского 2017. Ежегодник. С. 96–97. Казань: КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, 2018.
3. Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Коновалов Д.А., Степанов А.Л.: Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского 2018. Ежегодник. С. 90–92. Казань: КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, 2019.