

ОБЩИЕ ПРОБЛЕМЫ ФИЗИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И ПРЕПОДАВАНИЯ ФИЗИКИ

УДК 621.317.7

УНИВЕРСАЛЬНАЯ СХЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДЫХ ТЕЛ¹

Д.А. Великанов^{*}, И.С. Игнатов^{**}, Н.В. Волков^{*}

Описана схема универсального управляемого от персонального компьютера источника постоянного тока. Схема предназначена для применения в установке для измерений проводимости, вольт-амперных характеристик $V(I)$ и дифференциальных сопротивлений $dV/dI(I)$ в широком диапазоне измеряемых сопротивлений. Имеется пять диапазонов изменения измерительного тока I_{st} от $0 \div \pm 10$ мкА до $0 \div \pm 100$ мА, точность установки и минимальная величина приращения тока определяется диапазоном изменения I_{st} . Для диапазона $0 \div \pm 1$ мА минимальный дискрет приращения тока составляет 0,5 мкА, коэффициент стабилизации по току не менее 10^4 .

Методы определения электрических свойств хорошо отработаны и широко используются исследователями для определения фундаментальных параметров твердых тел: параметров энергетической зонной структуры; механизмов проводимости; характера и величины взаимодействий, имеющих место в исследуемых образцах. В то же время потребность экспериментаторов в несложных, но надежных установках, предназначенных для исследования проводимости, вольт-амперных характеристик, гальваномагнитных эффектов, остается по-прежнему высокой. Серийно выпускаемое для этих целей оборудование не всегда доступно из-за высокой стоимости, кроме того, возникают трудности при адаптации такого оборудования для конкретных физических задач, например, когда необходимо проводить изучение отклика исследуемой системы на внешнее воздействие (магнитное поле, электромагнитное излучение, давление, градиент температур и т.п.). Те же схемы, что описаны в литературе, либо достаточно сложные [1], либо имеют ограниченные возможности [2].

Мы предлагаем сравнительно простую универсальную схему для измерения электрических характеристик твердых тел. Схема позволяет проводить измерения проводимости, вольт-амперных характеристик (ВАХ) $V(I)$ и дифференциального сопротивления $dV/dI(I)$ в широком диапазоне сопротивлений измеряемых материалов. В комплекте с измерительной ячейкой, гелиевым оптическим криостатом и магнитной системой предлагаемая схема представляет собой широкофункциональную экспериментальную установку. Благодаря использованию персонального компьютера и простой схемы сопряжения и коммутации, реализована возможность проводить измерения электрических и гальваномагнитных свойств и обработку полученных данных в автоматическом режиме.

Функциональная схема установки, за исключением частей, отвечающих за управление температурой и магнитным полем, приведена на рис. 1. Измерительная ячейка C снабжена четырьмя золочеными контактными зондами, два из которых являются токовыми (1 и 2) и предназначены для пропускания стабилизированного постоянного тока через образец и два – потенциальными контактами (3 и 4) – для снятия напряжения, пропорционального сопротивлению образца. За счет упругих свойств зондов обеспечиваются хороший их контакт с образцом и, в то же время, надежная фиксация во время проведения измерений. Основу установки составляет прецизионный источник постоянного тока DC . При измерении проводимости на постоянном токе выходной стабилизированный ток I_{st} от источника подается на измерительную ячейку с образцом S (токовые контакты 1 и 2). Сигнал с потенциальных контактов 3 и 4 после инструментального усилителя IA поступает через канал связи АЦП–ЦАП в персональный компьютер для накопления и обработки. Установка величины и контроль тока I_{st} также осуществляется автоматически с клавиатуры персонального компью-

¹ Настоящая работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (грант № 02-02-17224-а) и РФФИ-«Енисей» (грант № 02-02-97702).

^{*} © Д.А. Великанов, Н.В. Волков, 2004; НИУ Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН; Красноярский государственный университет (Россия); E-mail: volk@iph.krasn.ru

^{**} © И.С. Игнатов, 2004; Красноярский государственный университет (Россия).

тера. Программное обеспечение позволяет, помимо точной установки величины тока, линейно разворачивать I_{st} для получения ВАХ.

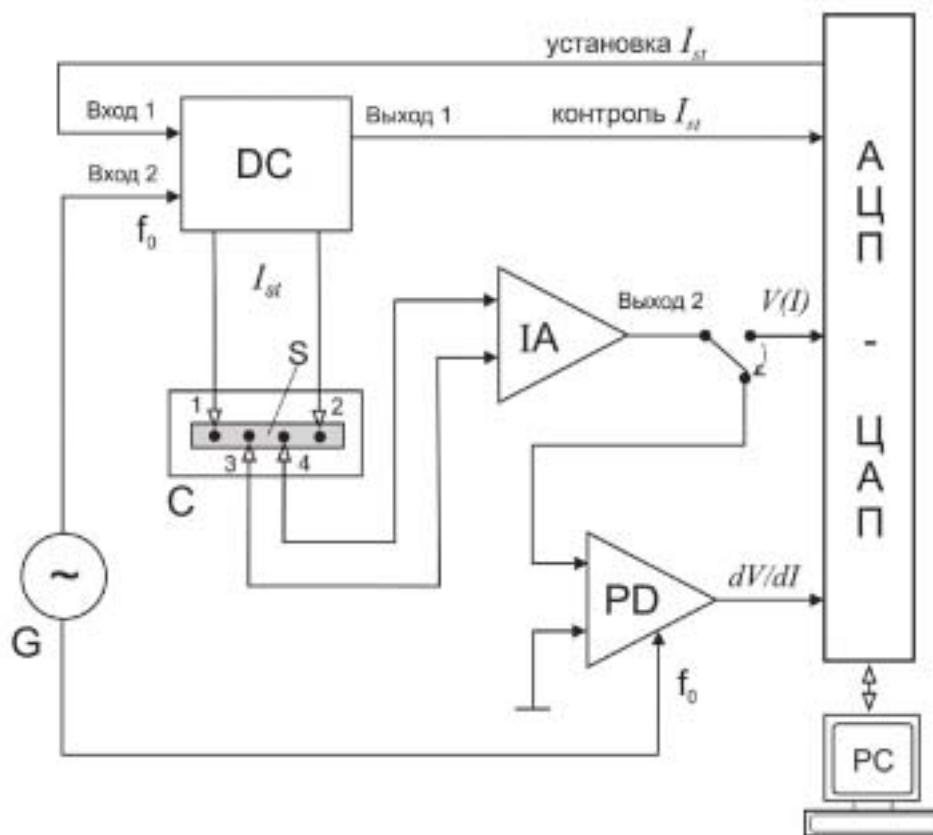


Рис. 1. Функциональная схема установки для измерения электрических характеристик твердых тел: DC – управляемый источник тока; C – измерительная ячейка; S – образец; IA – инструментальный усилитель; G – генератор низкой частоты; PD – синхронный детектор; АЦП-ЦАП – канал связи с компьютером; PC – персональный компьютер

Измерение величины дифференциального сопротивления $dV/dI(I)$ исследуемого образца происходит следующим образом. На один из управляющих входов DC (Вход 2) от генератора низкой частоты G поступает сигнал, в результате постоянная составляющая выходного тока оказывается промодулированной, амплитуда и частота модуляции f_0 задаются генератором G. Для выделения и детектирования синусоидального сигнала на потенциальных контактах (3 и 4) образца используется синхронный детектор PD. Напряжение с выхода синхронного детектора, пропорциональное $dV/dI(I)$, подается для обработки через плату сопряжения в компьютер. Для сбора экспериментальных данных и управления схемой мы использовали готовую плату ввода в компьютер и вывода аналоговых сигналов RL-88AC, разработанную Научно-исследовательской лабораторией автоматизации проектирования (НИЛ АП, www.rlda.ru). Плата является внешним по отношению к компьютеру блоком и подключается к последовательному порту RS-232 компьютера. Аналоговые входы и аналоговые выходы прибора имеют диапазон напряжений ± 10 В.

Все узлы установки традиционные, и нет необходимости в их подробном описании, исключение составляет схема источника тока, которая является оригинальной. Принципиальная схема управляемого источника тока и часть схемы регистрации приведены на рис. 2. В схеме источника тока применены прецизионные операционные усилители типа К140УД17А.

На Вход 1 схемы источника тока во время измерений подается либо фиксированное, либо медленно изменяющееся во времени напряжение с выхода ЦАП, входящего в состав платы сопряжения RL-88AC. Величиной этого напряжения задается сила постоянного тока I_{st} через исследуемый образец S. Диапазон входных напряжений составляет $0 \div \pm 10$ В.

На Вход 2 подается сигнал с выхода генератора переменного напряжения G в тех случаях, когда необходимо исследовать дифференциальное сопротивление образца. Амплитуда переменного напряжения на Входе 2 определяет силу переменной составляющей тока через образец S.

Общие проблемы физического эксперимента и преподавания физики

На микросхемах $M1$, $M2$ выполнены повторители входных напряжений. Микросхема $M3$ вместе с каскадом усиления мощности на комплементарных транзисторах $T1$, $T2$ являются собственно генератором тока, подводимого к исследуемому образцу S . Напряжения с выходов микросхем $M1$, $M2$ подаются на неинвертирующий вход микросхемы $M3$ по схеме суммирования, формируя опорный сигнал для генератора тока. Корректирующий конденсатор $C2$ предотвращает самовозбуждение генератора тока.

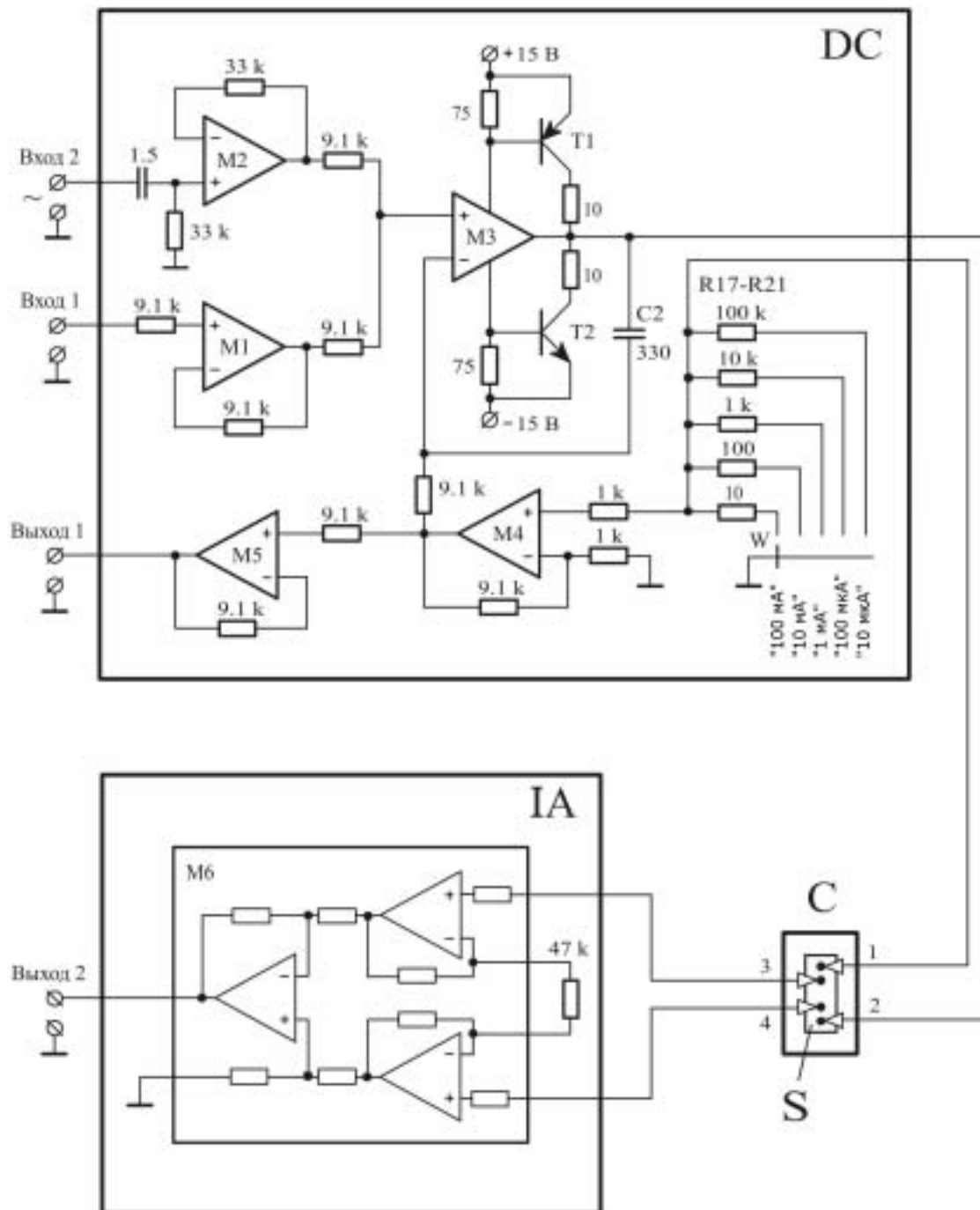


Рис. 2. Принципиальная схема управляемого источника тока и часть схемы регистрации: $M1$ – $M5$ – $K140УД17А$, $M6$ – $AD620AN$, $T1$ – $КТ816В$, $T2$ – $КТ817В$

Устройство имеет пять диапазонов по постоянному току I_{st} : $0 \div \pm 10$ мкА, $0 \div \pm 100$ мкА, $0 \div \pm 1$ мА, $0 \div \pm 10$ мА, $0 \div \pm 100$ мА. В зависимости от сопротивления исследуемого образца S в цепь измерительного тока последовательно с образцом S включается один из резисторов обратной связи $R17$ – $R21$. Переключение диапазонов производится с помощью пятипозиционного галетного переключателя W . Напряжение с резистора

стора обратной связи усиливается неинвертирующим усилителем с коэффициентом усиления 10, собранным на микросхеме *M4*, и подаётся на инвертирующий вход микросхемы *M3*. Тем самым, за счёт отрицательной обратной связи, обеспечивается стабильная работа устройства. Коэффициент стабилизации по току не менее 10^4 . Минимальный дискрет приращения тока определяется разрядностью ЦАП, которая для платы сопряжения RL-88AC составляет 12. Это, к примеру, при работе в диапазоне измерительных токов $I_{st} = 0 \div \pm 1$ мА даёт возможность менять I_{st} с минимальным шагом 0,5 мкА.

Буферный каскад, выполненный по схеме повторителя напряжения на микросхеме *M5*, служит для устранения влияния внешних электрических цепей на устойчивую работу источника тока. На его выходе (*Выход 1*) устанавливается напряжение, которое прямо пропорционально силе измерительного тока I_{st} .

Для регистрации и усиления напряжения, падающего на исследуемом образце *S*, мы применили интегральный инструментальный усилитель типа AD620AN. На его выходе (*Выход 2*) присутствует информация о величине напряжения V , падающего на образце *S*. Сигналы с *Выхода 1* и *Выхода 2* подаются для оцифровки на входы каналов тока *I* и напряжения V АЦП, входящего в состав платы RL-88AC.

Запитывается схема источника тока двуполярным стабилизированным напряжением ± 15 В. Для улучшения помехозащищённости устройства в цепях питания микросхем *M1*, *M2*, *M4–M6* установлены дополнительные RC фильтры (рис. 3).

Соединение источника тока DC и инструментального усилителя *IA* с измерительной ячейкой *C* выполнено витыми парами проводов в экране, причём каждая пара экранировалась отдельно.

Возможности установки, построенной на базе описанного источника тока, можно хорошо проиллюстрировать, приведя данные по исследованию туннельного вклада в проводимость структуры, представляющей собой монокристалл манганита с нанесенной на него методом молекулярно лучевой эпитаксии пленки железа ($\text{Eu}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{Fe}$) [3]. На рис. 4 приведены ВАХ и поведение дифференциального сопротивления $dV/dI(I)$ структуры при температуре в отсутствие магнитного поля H и при $H = 1$ кЭ. Каждая точка на графиках представляет результат одного измерения. При записи дифференциального сопротивления амплитуда модуляции постоянной составляющей тока на образце составляла 1 мкА, частота модуляции $f_0 = 10$ кГц. Нелинейности ВАХ связаны с переходным слоем, обладающим диэлектрическими свойствами. Зависимость особенностей ВАХ от H , что явно проявляется на зависимостях $dV/dI(I)$, определяется изменением взаимной ориентации намагниченностей электродов: кристалла манганита и пленки железа.

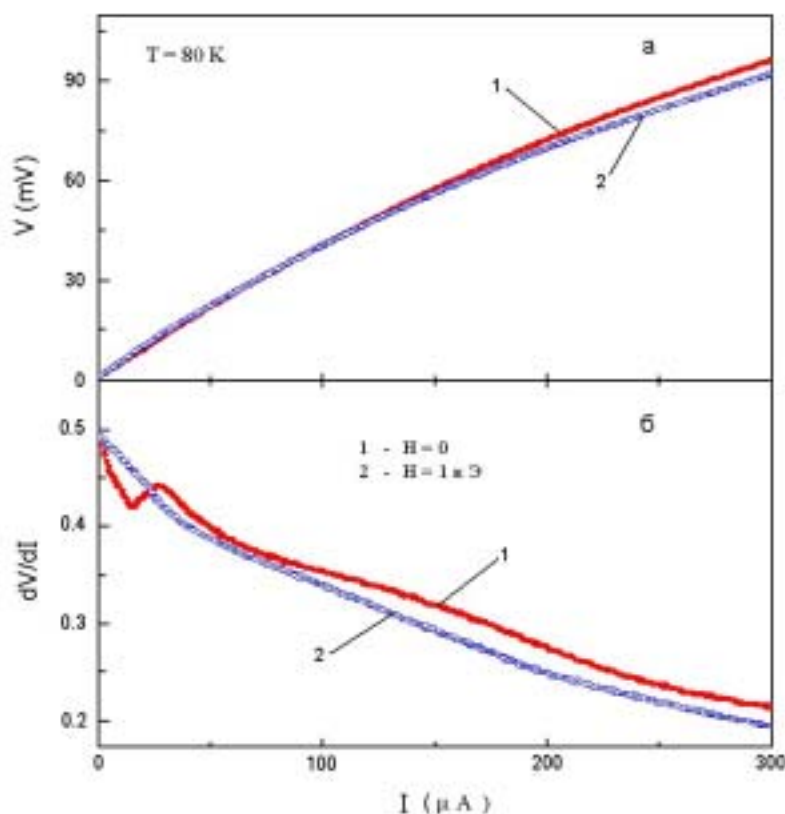


Рис.4. Структура $\text{Eu}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$ (монокристалл)/Fe (пленка), $T = 80$ К: а – вольт-амперная характеристика $V(I)$; б – дифференциальное сопротивление $dV/dI(I)$; 1 – в отсутствие магнитного поля, $H = 0$; 2 – в магнитном поле $H = 1$ кЭ

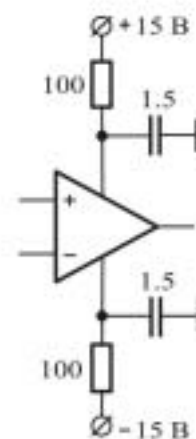


Рис. 3. Способ питания микросхем

рывать, приведя данные по исследованию туннельного вклада в проводимость структуры, представляющей собой монокристалл манганита с нанесенной на него методом молекулярно лучевой эпитаксии пленки железа ($\text{Eu}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{Fe}$) [3]. На рис. 4 приведены ВАХ и поведение дифференциального сопротивления $dV/dI(I)$ структуры при температуре в отсутствие магнитного поля H и при $H = 1$ кЭ. Каждая точка на графиках представляет результат одного измерения. При записи дифференциального сопротивления амплитуда модуляции постоянной составляющей тока на образце составляла 1 мкА, частота модуляции $f_0 = 10$ кГц. Нелинейности ВАХ связаны с переходным слоем, обладающим диэлектрическими свойствами. Зависимость особенностей ВАХ от H , что явно проявляется на зависимостях $dV/dI(I)$, определяется изменением взаимной ориентации намагниченностей электродов: кристалла манганита и пленки железа.

В целом опыт работы с установкой, описанной в данной статье, продемонстрировал ее высокую надежность и очень хорошую воспроизводимость результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Житницкий Е.А. Универсальная схема для измерения малых нелинейностей вольт-амперных характеристик / Е.А.Житницкий, А.А.Захаров // ПТЭ.- 1992.- № 4.- С. 197-200.
2. Андреев А.Б. Прецизионный стабилизатор постоянного тока / А.Б.Андреев, В.Д.Ведерников // ПТЭ.- 1986.- № 4.- С. 122-123.
3. Волков Н.В. Магнитосопротивление туннельного типа в структуре $\text{Eu}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$ (монокристалл)/Fe (пленка) / Н.В.Волков, Г.С.Патрин, Г.А.Петраковский, К.А.Саблина, С.Г.Овчинников, С.Н.Варнаков // Письма в ЖТФ.- 2003.- Т. 29.- В. 5.- С. 54-60.

**A UNIVERSAL CIRCUIT FOR THE CONDUCTIVITY MEASUREMENTS
OF THE SOLID**

D.A.Velikanov, I.S.Ignatov, N.V.Volkov

A universal dc current circuit controlled by personal computer is described. The dc supply has been designed for equipment which allows to measure the conductivity, volt-current characteristics and differential resistance for wide range of the resistance of the solids. There are five ranges of changes for measuring current from $0 \div \pm 10 \mu\text{A}$ up to $0 \div \pm 100 \text{mA}$ in the device. The precision and minimal increment of the output current are determined by the current range. For the current range $0 \div \pm 1 \text{mA}$ minimal discrete value of the current is $0,5 \mu\text{A}$, stabilization factor of the current exceeds 10^4 .