

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ВЫСОКООМНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Карпец Ю.М.<sup>1</sup>, Здоровцев Г.Г.<sup>1</sup>, Кузин А.А.<sup>1</sup>, Климентьев С.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», Хабаровск, Россия (680021, Хабаровск, ул. Серышева, 47), e-mail: kuzin@festu.kv.ru

В работе описана автоматизированная установка для измерения вольт-амперной характеристики высокоомных материалов при температурах от комнатной до 120 °С с диапазоном измеряемых сопротивлений до 10<sup>15</sup> Ом·см. Автоматизированная установка позволяет нагревать исследуемый образец со скоростью 0.1-10 К/мин (с точностью измерения температуры не ниже 0,5 °С), измерять ток в диапазоне 10<sup>-6</sup>-10<sup>-12</sup>А, изменять напряжение на исследуемом образце в диапазоне от 10 до 1000 вольт. Получаемые в процессе измерения данные по последовательному интерфейсу передаются в компьютер. Создаваемый файл можно обрабатывать как средствами Microsoft Excel, так и программами Maple VI, Origin, что позволяет использовать специализированную среду для построения графиков и дальнейшей их математической обработки. Устройство позволяет автоматизировать процесс измерения температурной зависимости электропроводности образцов и повысить точность измерения по сравнению с ручным способом. Представлены результаты исследования температурной зависимости электропроводности кристаллов ниобата лития на данной установке.

Ключевые слова: автоматизированная установка, температурная зависимость электропроводности, ниобат лития.

## AN AUTOMATED SETUP FOR MEASURING OF THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE ELECTRICAL HIGH-RESISTANCE MATERIALS

Karpets Y.M.<sup>1</sup>, Zdorovtsev G.G.<sup>1</sup>, Kuzin A.A.<sup>1</sup>, Klimentev S.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia (680021, Khabarovsk, Serysheva street, 47), e-mail: kuzin@festu.khv.ru

The article describes an automated system for measuring the current-voltage characteristics of high-resistance materials with the range of the measured resistances to 10<sup>15</sup> Ω·sm. The setup allows the heating of the sample with a speed of 0.1-10 K/min (accuracy of temperature measurement is not lower than 0.5° C), the measuring of the current in the range of 10<sup>-6</sup>-10<sup>-12</sup>A and the changing of the voltage on the test sample in a range from 10 to 1000 V. The experimental data are transferred during the measurement on the serial interface to the computer. The created file can be treated as using Microsoft Excel and Maple programs VI, Origin, which allows the using of a specialized environment for building graphs and their further mathematical treatment. The device allows you to automate the process of measuring of the electrical conductivity temperature dependence of the samples and to improve the accuracy of measurement compared to the manual method. The results of the temperature dependence study of the electrical conductivity of lithium niobate crystals are presented.

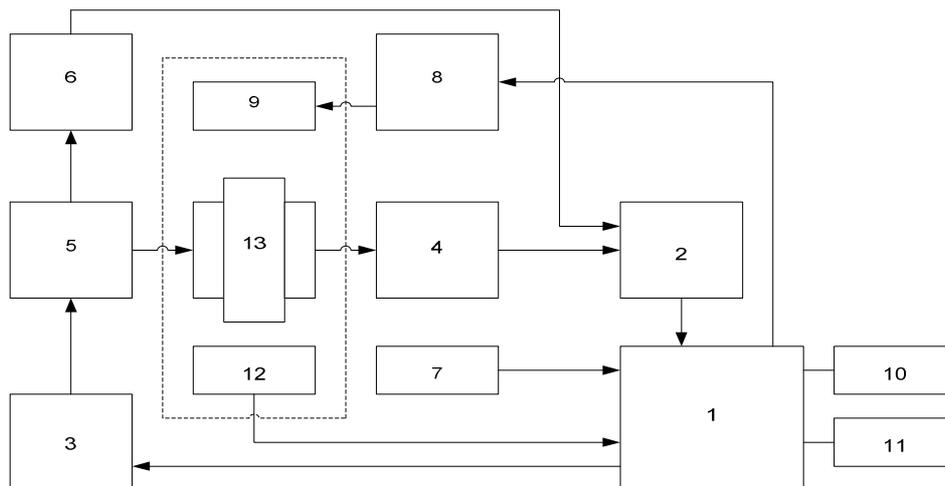
Keywords: automated setup, the temperature dependence of the electrical conductivity, lithium niobate.

В большинстве современных публикаций, посвященных исследованию температурной зависимости электропроводности кристаллов, приводятся результаты измерений, выполненных при T>330 К, а температурный диапазон 270-330 К исследован мало [1-5].

В данной работе описана автоматизированная установка, созданная авторами для измерения вольтамперной характеристики высокоомных материалов при температурах от комнатной до 120 °С (с точностью измерения температуры не ниже 0,5 °С).

### Описание автоматизированной установки

Структурная схема установки представлена на рис. 1. Для проведения измерений необходимо установить параметры измерения: максимальное напряжение на исследуемом образце (формируется модулем высоковольтного усилителя, сигнал на который поступает с модуля цифро-аналогового преобразователя), ширину шага выдаваемых напряжений (определяется временем нахождения образца под напряжением, задержкой между временем выдачи напряжения и временем измерения тока и напряжения). Перед запуском установки в автоматическом режиме запускается программа приема данных на компьютере и устанавливается соединение с компьютером.



*Рис. 1. Функциональная схема установки: 1 – устройство управления; 2 – аналого-цифровой преобразователь; 3 – цифро-аналоговый преобразователь; 4 – преобразователь ток-напряжение; 5 – источник напряжения; 6 – делитель напряжения; 7 – блок ввода информации; 8 – регулятор температуры; 9 – нагревательный элемент; 10 – система индикации; 11 – интерфейс цифровой связи; 12 – датчики температуры; 13 – образец.*

Для получения достоверных экспериментальных данных об объемных токах при использовании автоматизированной установки необходимо учитывать как емкость образца, так и входные параметры измерительной системы. Поэтому необходимо предварительно построить модель измерительной системы с целью оценки получаемого результата. Цель модели - описать процесс работы измерительной системы с учетом всех факторов, определяющих корректность проводимых измерений.

Можно выделить два этапа в работе данной измерительной системы. Первый активный этап - выработка сигнала воздействия на исследуемый объект путем установки требуемого номинала напряжения. Второй этап - анализ реакции объекта путем измерения тока, обусловленного данным напряжением.

Для определения характера зависимости измеряемой величины от времени изобразим упрощенную эквивалентную электрическую схему рассматриваемой измерительной системы (рис. 2).

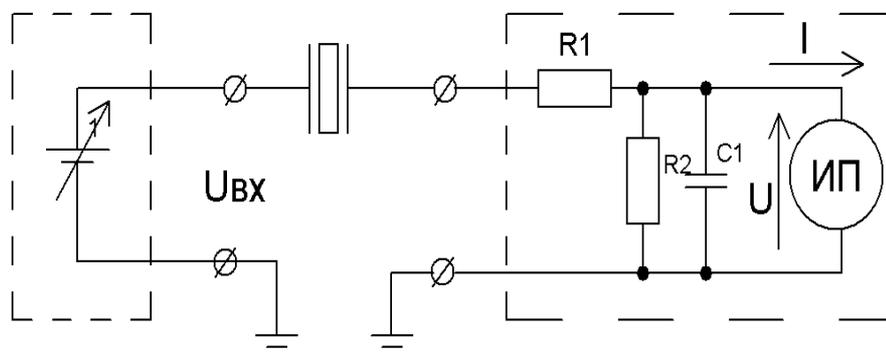


Рис. 2. Модель измерительной системы.

Входная схема измерительного прибора (ИП) обладает внутренним входным сопротивлением и входной емкостью, то есть входное сопротивление имеет реактивную составляющую:

$$Z_{BX} = R_1 + R_2 \parallel X_{CBX}.$$

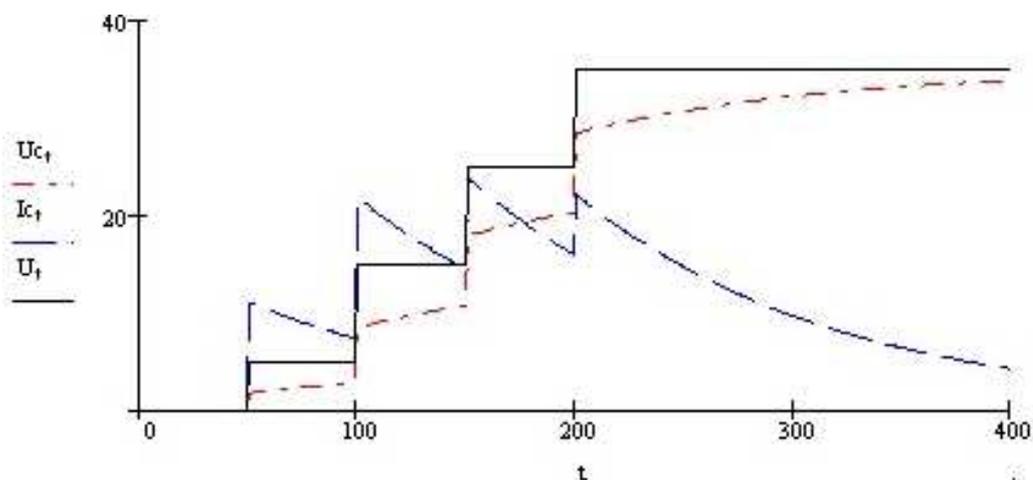
Наличие реактивной составляющей во входном сопротивлении измерителя тока накладывает ограничение на скорость проведения измерения.

Для произвольного числа шагов выражения имеем:

$$u(t) = (1 - e^{-\frac{t}{R_1 C}})(U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \phi(t - \Delta t \cdot k) \cdot \Delta U)$$

$$i(t) = \frac{C}{\tau} \cdot e^{-\frac{t}{R_1 C}} \cdot (U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \phi(t - \Delta t \cdot k) \cdot \Delta U),$$

где  $\Delta U$  - шаг увеличения напряжения измерения;  $\Delta t$  - длительность каждого шага.



*Рис. 3. Пример зависимости от времени тока и напряжения.*

На рис. 3 приведен пример временной зависимости тока и напряжения в цепи измерительного прибора.

Таким образом, данная модель определяет характер зависимости измеряемой величины от времени в зависимости от значения элементов входной цепи измерительного прибора и позволяет количественно определить моменты времени, в которые корректно проводить измерения.

Исследуемый образец помещается между выводами высоковольтного источника постоянного напряжения. Последовательно в цепь включен измеритель тока, а параллельно измеритель напряжения. Измерители тока и напряжения представляют собой 12-разрядные АЦП с входными согласующими усилителями. Так как максимальное значение входного сигнала АЦП ограничено его техническими характеристиками, то делитель напряжения, датчик тока вместе с входными согласующими усилителями должны обеспечить изменение входного сигнала на входах АЦП в нужном диапазоне при изменении тока и напряжения от минимального до максимального значения. Делитель напряжения представляет собой цепь последовательно включенных резисторов. В данной системе для этой цели использовался уже имеющийся стандартный делитель напряжения (ДНВ).

Микроконтроллер согласно алгоритму работы в определенные моменты времени выдает команды на периферийные устройства для осуществления изменения напряжения источника высокого напряжения с заданным шагом. Он так же осуществляет регистрацию на каждом шаге величины напряжения и тока на исследуемом образце. Регистрация осуществляется с помощью датчиков и измерителей тока и напряжения, значение которых преобразуется в цифровые сигналы с помощью аналого-цифровых преобразователей. Результат преобразования считываются микроконтроллером через трехпроводной интерфейс SPI. Текущие значения напряжения и тока отображаются на жидкокристаллическом дисплее.

Измеренные значения тока и напряжения в заданном формате отправляются по последовательному порту на ЭВМ для дальнейшей обработки данных.

После запуска установки в автоматическом режиме происходит последовательное увеличение напряжения на опытном образце на величину шага с одновременной регистрацией тока и напряжения на каждом шаге и отправка измеренных данных по последовательному порту в компьютер в программу приема данных. Программа осуществляет запись принятых данных в файл. Обработка данных осуществляется в математической среде Maple, в которой на основе этих данных можно построить графики и их обработку.

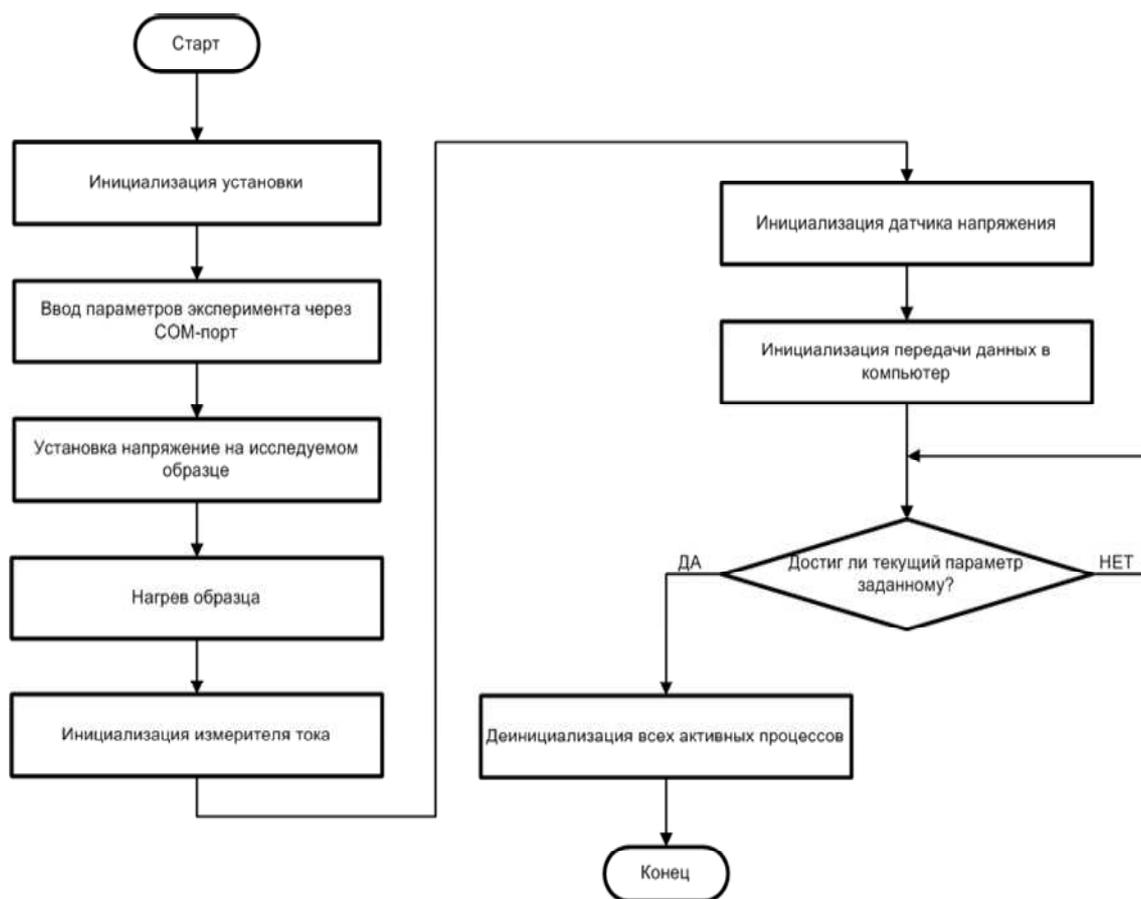
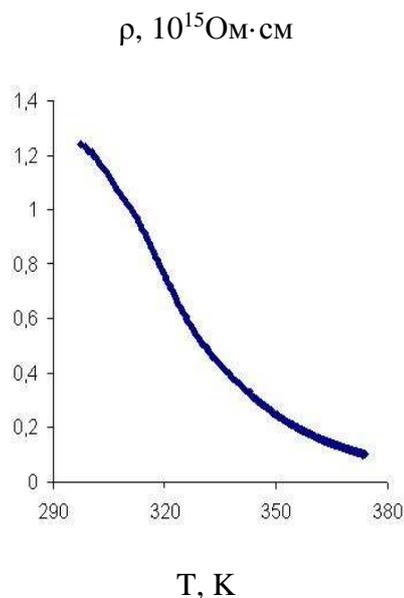


Рис. 4. Алгоритм измерения.

Устройство позволяет автоматизировать процесс снятия вольт-амперной характеристики и существенно повысить точность измерения по сравнению с ручным способом. В качестве устройства управления используется микроконтроллер AVR. Он обеспечивает работу устройства в соответствии с заданным алгоритмом (рис. 4).

На рис. 5 представлена температурная зависимость удельного сопротивления кристалла ниобата лития, полученная на описанной установке.



*Рис. 5. Зависимость удельного сопротивления от температуры кристалла (LiNbO<sub>3</sub>: Fe – 0.5 вес.%).*

Полученные экспериментальные зависимости показывают, в частности, что для интерпретации механизма проводимости сильнолегированных кристаллов ниобата лития требуются более сложные модели.

### **Заключение**

Таким образом, описанная выше установка позволяет автоматизировать процесс снятия температурной зависимости электропроводности высокоомных материалов и существенно повысить точность измерения по сравнению с ручным способом. Автоматизированная установка позволяет нагревать исследуемый образец со скоростью 0.1-10 К/мин, измерять ток в диапазоне  $10^{-6}$ - $10^{-12}$  А, изменять напряжение на исследуемом образце в диапазоне от 10 до 1000 вольт. В установке реализована возможность обмена данными с ЭВМ по последовательному порту для передачи измеренных данных в компьютер с целью их дальнейшей обработки стандартными математическими пакетами типа Maple, Matlab и др. Установку можно использовать для исследования высокоомных материалов [6-8], а также при интерпретации экспериментальных результатов по изучению термоэлектрических свойств полупроводниковых структур [8-10].

### **Список литературы**

1. Здоровцев Г.Г., Иванов В.И., Карпец Ю.М., Климентьев С.В. Термоэлектрические свойства несимметричной сэндвичной структуры металл-ниобат лития-металл // Известия Томского политехнического университета. - 2007. - Т. 311. - № 2. - С. 102-105.

2. Здоровцев Г.Г., Иванов В.И., Марченков Н.В. Термостимулированная ЭДС в сэндвичной структуре металл–ниобат лития-металл // Информатика и системы управления. - 2005. - № 1 (09). - С. 55-60.
3. Здоровцев Г.Г., Карпец Ю.М., Лебедев В.А. Температурная зависимость электропроводности легированных кристаллов ниобата лития // Фундаментальные исследования. - 2014. - № 9-7. - С. 1512-1516.
4. Иванов В.И. Термостимулированные токи в несимметричной сэндвичной структуре металл – сегнетоэлектрик – металл : монография. - Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2007. - 67 с.
5. Иванов В.И., Карпец Ю.М., Климентьев С.В. Тепловые приемники излучения на основе тонкослойных структур металл – сегнетоэлектрик – металл : монография. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2008. - 80 с.
6. Иванов В.И., Карпец Ю.М., Климентьев С.В. ТермоЭДС в легированных кристаллах ниобата лития с электродами из различных металлов // Известия высших учебных заведений. Физика. - 2001. - № 1. - С. 96-97.
7. Иванов В.И., Климентьев С.В., Корчевский В.В. Использование динамического пироэффекта в термовольтаическом приемнике излучения // Вестник Тихоокеанского государственного университета. - 2010. - № 2. - С. 013-018.
8. Карпец Ю.М., Максименко В.А. Фотоиндуцированное рассеяние света в кристаллах  $\text{LiNbO}_3:\text{Rh}$  // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71. – № 9. - С. 6-7.
9. Карпец Ю.М., Строганов В.И., Марченков Н.В., Емельяненко А.В. Спекл-структура излучения, рассеянного фоторефрактивным кристаллом // Оптика и спектроскопия. - 1989. - Т. 67. - № 12. - С. 982.
10. Ivanov V.I., Karpets Yu.M., Marchenkov N.V., Zdorovtsev G.G. Thermo-EMF in  $\text{LiNbO}_3$  crystals with different metal electrodes // Fundamental problems of Optoelectronics and Microelectronics, Yuri N. Kulchin, Oleg B. Vitrik, Vladimir I. Stroganov, Editors, Proceedings of SPIE. - 2005. - Vol. 5851. - P. 415-419.

**Рецензенты:**

Крылов В.И., д.ф.-м.н., профессор кафедры «Физика» ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный гуманитарный университет», г. Хабаровск;

Жуков Е.А., д.ф.-м.н., профессор кафедры «Электротехника и электроника» ФГБОУ ВПО «Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск.