

УДК 661.66+54.07

С. А. Мошкалев

*Центр полупроводниковых компонентов,  
Государственный университет Кампинаса*

В. В. Перепеловский, Н. И. Михайлов, Н. Е. Дворецкий  
*Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)*

В. Л. Иванов, О. В. Пахомов  
*Университет ИТМО*

## **Распределенная автоматизированная система измерений электрических параметров контактов многослойных графеновых нанолент**

*Рассмотрена реализация программно-аппаратного информационно-измерительного комплекса, представляющего собой распределенную автоматизированную систему измерения параметров контактов многослойных графеновых нанолент, приводятся результаты исследования влияния термического и динамического отжига на вольт-амперные характеристики образцов.*

### **Распределенная система, LabView, многослойные графеновые наноленты, вольт-амперные характеристики, отжиг**

С открытием молекулы  $C_{60}$  началась революция в области углеродных наноструктур, приведшая к появлению таких новых материалов, как одностенные и многостенные углеродные нанотрубки [1], а также однослойный и многослойный графен, к которому сегодня привлечено огромное внимание [2], [3]. Столь пристального внимания графеновые наноленты удостоились в связи с теоретическим предсказанием интересных электрических свойств, зависящих от краевого направления и ширины образцов [4]–[6].

Распространению в современной электронной промышленности устройств на основе углерода, в том числе и на основе многослойных графеновых нанолент, препятствует по большей части несовершенная технология синтеза углеродных материалов, а также неотработанная методика формирования контакта многослойных графеновых нанолент с металлами. По этой причине особый интерес вызывают исследования электрофизических свойств контактов углеродных нанолент с металлом, а также влияние динамического и термического отжига на вольт-амперные характеристики (ВАХ) контактов.

Исследования свойств контакта *многослойная графеновая нанолента – металл* требуют широкого диапазона изменения режимов пропускания

тока через образец. Это касается как амплитуд напряжений, подаваемых на образцы, так и промежутков времени, в течение которых идет процесс динамического отжига и измерение ВАХ. Проведению измерений предшествует оценка сопротивления образца, для чего параллельно образцу подключается защитное сопротивление, предотвращающее пробой контакта вследствие возможного резкого уменьшения сопротивления образца при больших напряжениях.

Указанные особенности измерений обуславливают необходимость автоматизации и дистанционного управления режимами отжига, измерений ВАХ и фиксации результатов. Для этого была разработана распределенная архитектура, основанная на промышленных модулях управления и сбора данных I7000 производства компании ICP. Информационное обеспечение разработано в среде графического программирования LabView.

**Экспериментальная установка.** Распределенная система для исследования ВАХ многослойных графеновых нанолент состоит из трех модулей серии I7000 производства компании ICP: I7018 (АЦП), I7024 (ЦАП), I7065 (блок реле). Все три модуля связаны в единую систему и подключены к блоку преобразования интерфейсов (*N-port*,

производства компании MOXA) по протоколу RS485. Блок преобразования, в свою очередь, получает команды по протоколу TCP/IP и перенаправляет их модулям I7000. Общая схема управления и сетевого сбора данных представлена на рис. 1.

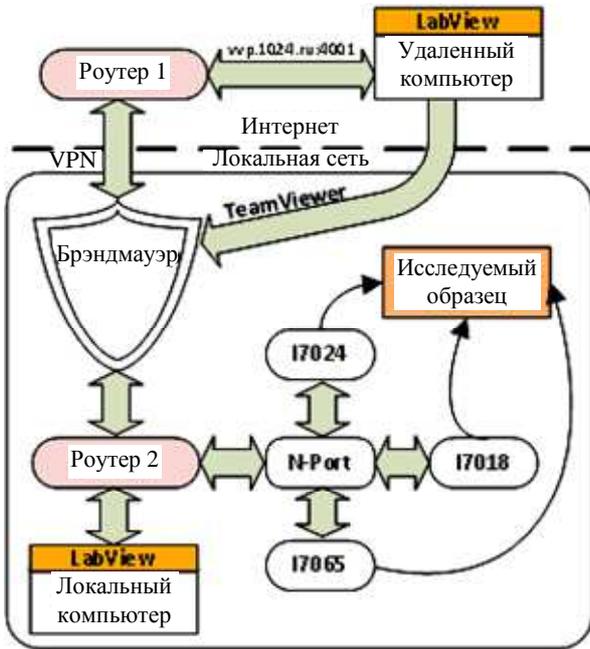


Рис. 1

Принципиальная электрическая схема представлена на рис. 2. Для предотвращения скачков напряжения на образцах при подключении к измерительной системе была применена схема с параллельно включенным защитным резистором. После того как подключение выполнено, а на выводах образца установлен фиксированный уровень потенциала, производится отключение защитного сопротивления и проводятся измерения ВАХ. Для задач включения/отключения частей схемы используется блок реле.

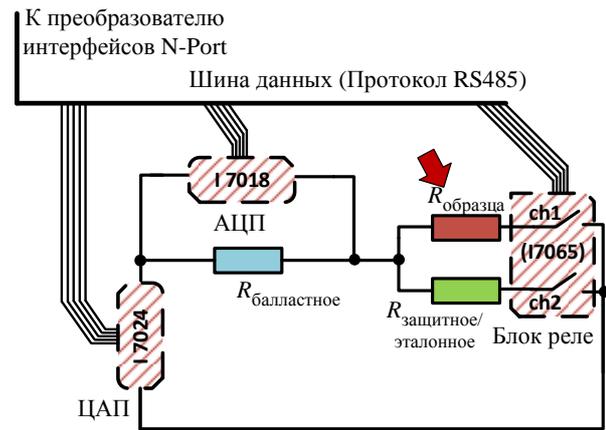


Рис. 2



Рис. 3

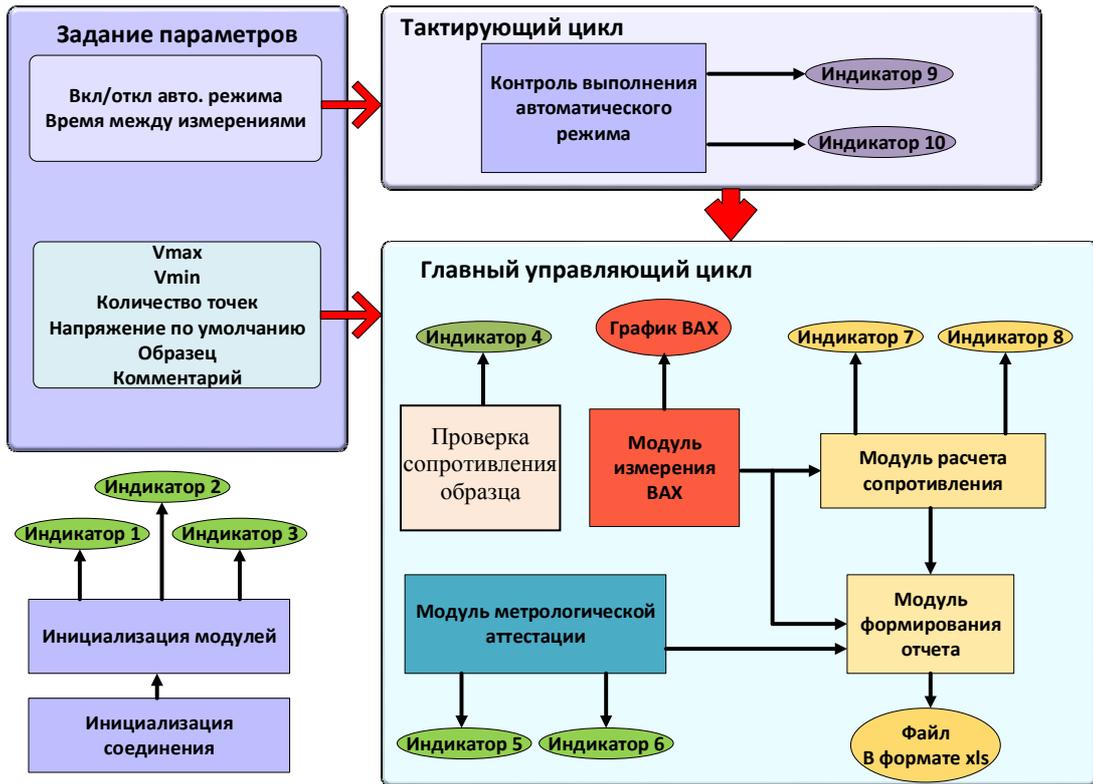


Рис. 4

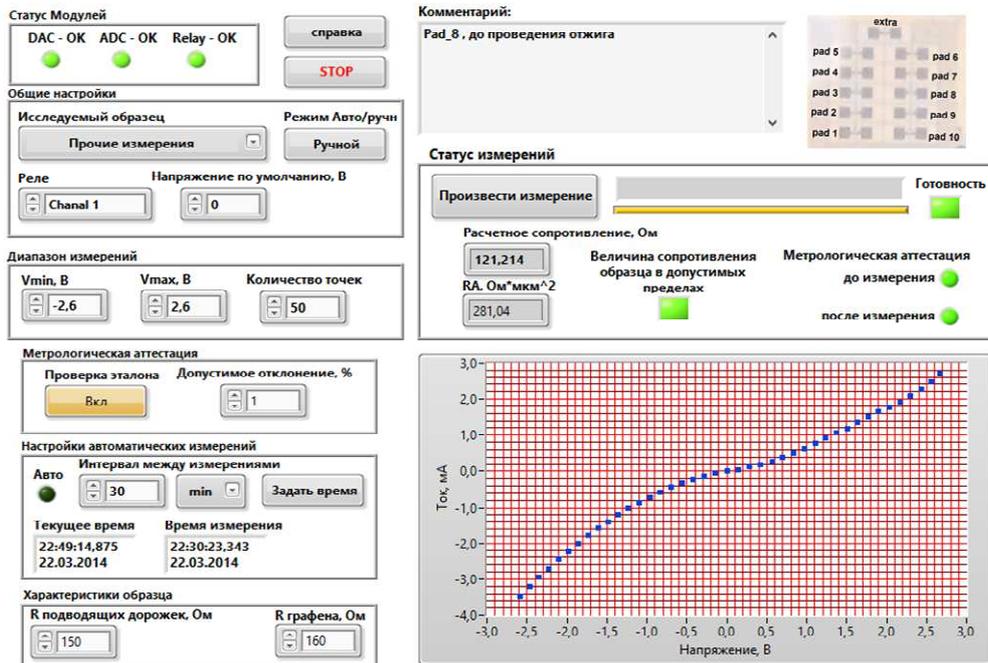


Рис. 5

**Информационное обеспечение.** Программа управления выполнена в среде графического программирования LabView, позволяющей создавать производительные, гибкие, хорошо масштабируемые системы с минимальным временем разработки.

Обращение к модулям происходит по протоколу TCP/IP. Краткий алгоритм работы программы представлен на рис. 3.

Метрологическая аттестация измерительной установки производится измерением ВАХ эталонного резистора номиналом в 10 кОм с отклонением  $\pm 0.05\%$ . Проверка производится до и после каждого проведенного эксперимента. Информация о погрешности заносится в протокол измерений и сохраняется со всеми измерениями.

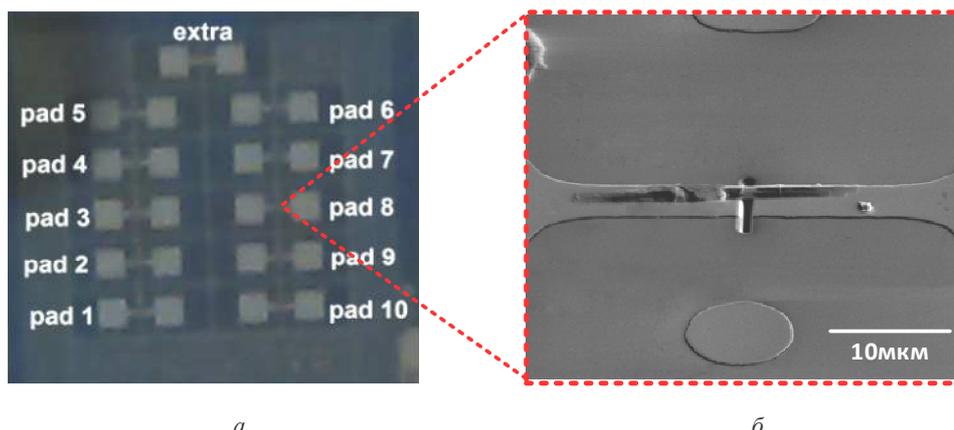


Рис. 6

Общая погрешность измерений, вносимая установкой, не превышает 2 %.

Разработанное программное обеспечение позволяет работать как в ручном, так и в автоматическом режиме. При работе в автоматическом режиме можно установить временные интервалы, через которые необходимо проводить измерения ВАХ, а также задать напряжение, поддерживаемое на образце между измерениями. Постоянное напряжение используется для проведения динамического отжига образца.

Управляющая программа в своем составе имеет две параллельно выполняющиеся задачи: 1) «главный управляющий цикл», осуществляющий основные настройки системы; 2) «тактирующий цикл», отвечающий за выполнение измерений в автоматическом режиме. Общая структурная схема программного обеспечения представлена на рис. 4. Главный управляющий цикл выполняет следующие функции: проверка сопротивления образца перед измерениями, проведение метрологической аттестации системы до и после проведения измерений, измерение ВАХ образца, расчет полного сопротивления образца и удельного сопротивления контактных областей, формирование отчета и отображение результатов.

Отчет формируется в виде таблицы Excel, в которую вносится дата проведения эксперимента, номер образца, комментарий, заданный пользователем, информация о погрешности измерений, расчетное сопротивление образца, измеренная ВАХ.

На лицевой панели программы задаются все параметры эксперимента, отображается информация о статусе эксперимента, а также выводится график измеренной ВАХ. Вид лицевой панели управляющей программы представлен на рис. 5.

**Экспериментальные образцы** синтезированы методом сонкирования графита. Многослойные графеновые наноленты осаждались на электроды с

помощью диэлектрофореза: приложения переменного электрического поля к паре электродов, после чего капля, содержащая образец многослойной графеновой наноленты, притягивается подобно диполю. На рис. 6 показаны фотоснимки исследованных образцов: *а* – общий вид исследованных образцов электродной системы; *б* – снимок образца – многослойной графеновой ленты, нанесенной на поверхность металлических электродов.

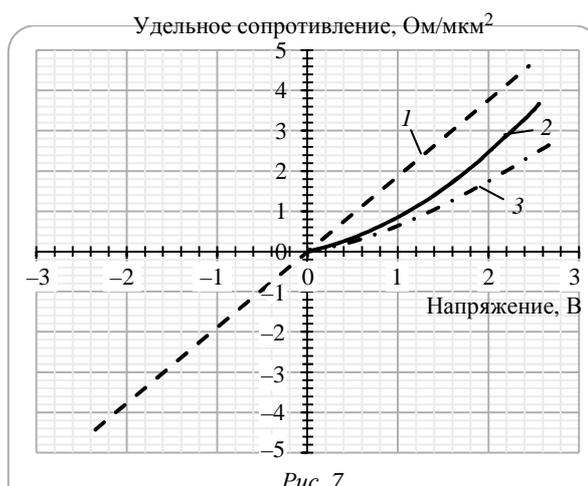


Рис. 7

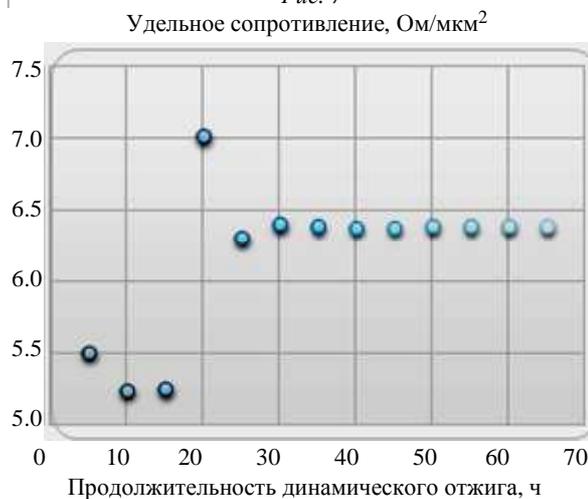


Рис. 8

В процессе работы были исследованы образцы многослойных графеновых нанолент с металлическими контактами. Для каждого из образцов были измерены ВАХ. При этом исследовалось влияние термического и динамического отжига на ВАХ образцов. Образцы подвергались термическому отжигу при температурах 200 и 500 °С. После первого термического отжига (200 °С) сопротивление образцов уменьшилось, но сохранялась нелинейность ВАХ. Для всех образцов, прошедших два цикла термического отжига при 200 и 500 °С, свойственен линейный вид ВАХ, что иллюстрирует рис. 7.

Реализованная распределенная система позволяет осуществить измерения в автоматическом режиме, с возможностью варьировать в широких пределах амплитуду и скважность подаваемого на образец потенциала, и осуществлять динамический отжиг образцов с фиксацией их ВАХ. На рис. 7 представлены результаты динамического отжига: 1 – до отжига; 2 – после отжига I; 3 – после отжига II (500 °С; 1 ч).

Из полученных результатов динамического отжига видно, что динамический отжиг приводит к стабилизации ВАХ, а сопротивление увеличивается и стремится к некоему равновесному значению. Следует отметить, что первоначальное сопротивление образцов изменялось в широких пределах. Динамический отжиг позволил существенно сократить диапазон этих изменений. На рис. 8 показано влияние динамического отжига на удельное сопротивление. Результаты (рис. 8) показывают, что при одном значении напряжения на образце ток зависит от времени проведения динамического отжига и через определенное время достигает фиксированного уровня.

Разработанная автоматизированная система открывает широкие возможности для исследования свойств контактов, в частности контактов *многослойная графеновая нанолента – металл*, и позволяет исследовать влияние динамического отжига на электрические характеристики таких структур, а также осуществлять формовку контактов путем отжига.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Low contact resistivity and strain in suspended multilayer graphene / F. P. Rouxinol, R. V. Gelamo, R. G. Amici, A. R. Vaz, S. A. Moshkalev // *Appl. Phys. Lett.* 2010. № 97. P. 253104.
2. Size-controlled synthesis of graphite nanoflakes and multi-layer graphene by liquid phase exfoliation of natural graphite / A. V. Alaferdov, A. Gholamipour-Shirazi, M. A. Canesqui, Y. A. Danilov and S. A. Moshkalev // *Carbon*. 2014. Vol. 69. P. 525–535.
3. Nonlocal laser annealing to improve thermal contacts between multi-layer graphene and metals / V. A. Ermakov, A. V. Alaferdov, A. R. Vaz, A. V. Baranov, S. A. Moshkalev // *Nanotechnology*. 2013. № 24. P. 10–20.
4. Thermal transport in suspended and supported monolayer graphene grown by chemical vapor deposition / W. Cai, A. L. Moore, Y. Zhu, X. Li, S. Chen, L. Shi, R. Ruoff // *Nano Lett.* 2010. № 10. P. 1645–1651.
5. Onz Z. Y., Pop E. Molecular dynamics simulation of thermal boundary conductance between carbon nanotubes and SiO<sub>2</sub> // *Phys. Rev.* 2010. B 81. P. 234–242.
6. Balandin A. A. Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials // *Nature Mater.* 2011. № 10. P. 569–81.

S. A. Moshkalev

*Center for Semiconductor Components, Brazil*

V. V. Perepelovsky, N. I. Mikhailov, N. E. Dvorecky  
*Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»*

V. L. Ivanov, O. V. Pakhomov  
*ITMO University*

## DISTRIBUTED AUTOMATED SYSTEM FOR MEASUREMENT OF ELECTRICAL PARAMETERS OF CONTACTS MULTILAYER GRAPHENE NANORIBBONS

*Deals with the implementation of software and hardware measuring and information system i.e. automated distributed system of multilayer graphene nanoribbon contact measuring. The influence of thermal and dynamic annealing on current-voltage characteristics of devices is analyzed.*

**Distributed system, LabView, multilayer graphene nanoribbon, current-voltage characteristic, annealing**