

Разработаны стандартные образцы для оценки локального содержания макроэлементов в образцах волос по их длине. Показана возможность использования методики для ретроспективной количественной оценки метаболизма ЖНЭ при диагностическом обследовании пациентов, контроле и корректровке процесса лечения.

Предложенные методы анализа являются экономичными и экспрессными, что немаловажно для расширения области практического применения спектральных методов в медицинской диагностике и повышения эффективности лечения.

Изменения локального пространственного содержания макроэлементов по длине волос пациентов до и после лечения дают возможность оценить качество последнего и предусмотреть дальнейшие шаги процесса реабилитации.

Определение самого факта и момента резкого изменения содержания элементов может быть одним из маркеров при диагностике заболеваний и способствовать рациональному и объективному проведению необходимого лечения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Goyer R. A., Klassen C. D., Waalkes M. P. Metal toxicology. San Diego, 1995.
2. Зажогин А. П. Атомный спектральный анализ : курс лекций. Минск, 2005.
3. Скальный А. В. Микроэлементозы человека (диагностика и лечение). М., 1999.
4. Zecca L., Youdim Moussa B. H., Riederer P., Connor James R., Crichton Robert R. Iron, brain ageing and neurodegenerative disorders // Nature Rev. Neuroscience. 2004. Vol. 5. P. 863–873.
5. Пашиковская И. Д., Василевская Л. А., Нечипуренко Н. И. Коррекция нарушений сосудистой реактивности и про-, антиоксидантного статуса у пациентов с дисциркуляторной энцефалопатией методом лазерной гемотерапии // Дисфункция эндотелия: эксперименты и клинические исследования : материалы III Междунар. науч.-практ. конф. (Витебск, 18–22 мая 2012 г.). Витебск, 2012. С. 113–115.
6. Короткевич Е. А., Смянович А. Ф., Терехов В. С. Клиническая эпидемиология опухолей головного мозга и этапная медицинская помощь нейроонкологическим пациентам // Неврология и нейрохирургия в Беларуси. 2010. № 4. С. 86–97.
7. Нестерова Д. В. Ваш домашний доктор. Расшифровка анализов без консультации врача. М., 2011.
8. Патапович М. П., Пашиковская И. Д., Лэ Тхи Ким Ань, Нечипуренко Н. И., Зажогин А. П. Разработка методик определения содержания тяжелых металлов в волосах методом лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии // Фундаментальные науки – медицине : материалы Междунар. науч. конф. (Минск, 17 мая 2013 г.) : в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т физиологии ; редкол.: И. В. Залуцкий [и др.]. Минск, 2013. Ч. 2. С. 119–123.
9. Патапович М. П., Пашиковская И. Д., Лэ Тхи Ким Ань, Нечипуренко Н. И., Зажогин А. П. Исследование динамики метаболизма макро- и микроэлементов в организме человека методом лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии волос по их длине // Фундаментальные науки – медицине : материалы Междунар. науч. конф. (Минск, 17 мая 2013 г.) : в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т физиологии ; редкол.: И. В. Залуцкий [и др.]. Минск, 2013. Ч. 2. С. 123–125.
10. Патапович М. П., Докукина Т. В., Марчук С. А., Зажогин А. П. Оценка стресс-реакции матери и ребенка методами лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии волос // IV Конгресс физиков Беларуси (Минск, 24–26 апр. 2013 г.) : сб. науч. тр. / редкол.: С. Я. Килин [и др.]. Минск, 2013. С. 384–385.

Поступила в редакцию 20.03.2015.

Мария Петровна Патапович – кандидат физико-математических наук, преподаватель кафедры математики и физики факультета электросвязи УО «Высший государственный колледж связи».

Ирина Дмитриевна Пашиковская – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Республиканского научно-практического центра неврологии и нейрохирургии.

Наталья Ивановна Нечипуренко – доктор медицинских наук, профессор, заведующий лабораторией клинической патофизиологии нервной системы Республиканского научно-практического центра неврологии и нейрохирургии.

Жанна Игнатьевна Булойчик – кандидат химических наук, старший научный сотрудник кафедры физической оптики физического факультета БГУ.

Анатолий Павлович Зажогин – доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ.

УДК 537.611.2

В. А. ДОРОСИНЕЦ, И. ЦАО

СОСТОЯНИЕ СПИНОВОГО СТЕКЛА В МАГНИТНОЙ СИСТЕМЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК МАНГАНИТОВ $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$

Исследовалось фотоиндуцированное изменение физических свойств тонких пленок $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ под воздействием импульсов лазера $\text{Ti} : \text{Al}_2\text{O}_3$ ($\lambda = 780$ нм) с длительностью менее 100 фс и частотой повторения 78 МГц при криогенных температурах. Модифицированные пленки проявляют гистерезис магнитосопротивления при $T < 30$ К, для которой характерно также изменение знака температурного коэффициента сопротивления. Особенности на кривой $R(T)$ (рис. 1) в этой области интерпретируются в рамках модели квантовых поправок к электропроводности за счет слабой локализации и электрон-электронного взаимодействия. Предполагается, что изменение электрических и магнитных свойств

в низкотемпературной области обусловлено разупорядочением в электронной и магнитных системах манганитов в результате понижения содержания кислорода, что стимулирует фазовый распад с образованием кластеров с различным типом магнитного упорядочения и переход в состояние спинового стекла. Дополнительным подтверждением предложенной модели является различие кривых температурной зависимости намагничивания, снятых после охлаждения в отсутствие и при приложении магнитного поля.

Ключевые слова: манганиты; колоссальное магнитосопротивление; фазовый распад; спиновое стекло; слабая локализация; электрон-электронное взаимодействие.

The photoinduced change in physical features of thin $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ films as a result of the $\text{Ti} : \text{Al}_2\text{O}_3$ pulsed laser illumination ($\lambda = 780 \text{ nm}$, pulse duration Δt below 100 fs, repetition rate 78 MHz) at cryogenic temperatures has been investigated. The modified films exhibit a hysteresis of magnetoresistance in the temperature region $T < 30 \text{ K}$, where a change in a sign of the resistivity temperature coefficient is also characteristic. The features of the curve for the function $R(T)$ in this region are interpreted in terms of a model for quantum corrections to the electrical conduction and attributed to a weak localization and to the electron-electron interaction effects. It is supposed that a change in the electric and magnetic features at low temperatures is due to the oxygen content deficiency that stimulates the electron phase transition resultant in the creation of clusters with different types of magnetic ordering, followed by the transition into the spin glass state. The proposed model is validated additionally by the observed difference in forms of the magnetization temperature dependences measured after cooling with and without the use of a magnetic field.

Key words: manganites; colossal magnetoresistance; phase separation; spin glass; weak localization; electron-electron interaction.

Взаимосвязь зарядовых, спиновых, орбитальных и решеточных степеней свободы в манганитах является причиной разнообразия электронных фазовых состояний в них, конкуренция между которыми приводит к фазовому распаду и переходу в состояние фазового стекла [1]. Пространственная неоднородность электронной плотности и механические деформации стимулируют процесс фазового распада, а внешние воздействия (магнитное и электрическое поля, свет) позволяют эффективно смещать баланс между фазами, что открывает перспективу конструирования разнообразных электронных и магнитных элементов на основе манганитов. Изменения знака температурного коэффициента сопротивления в отдельных образцах манганитов при низких температурах [2] авторы связывали с квантовыми поправками к электропроводности (эффекты слабой локализации и электрон-электронного взаимодействия), проявляющимися в результате фазового распада, и эффектом Кондо. Однако эти выводы оспаривались в [3], поскольку образцы имели поликристаллическую структуру и потенциальные барьеры между кристаллитами могут обуславливать наблюдаемые аномалии в поведении температурной зависимости сопротивления $R(T)$.

В настоящей работе предлагается способ установления механизмов электропроводности манганитов, проявляющих особенности при низких температурах, путем синтеза тонких пленок с исходно совершенной кристаллической структурой, что исключает возможность возникновения потенциальных барьеров из-за разориентации кристаллитов. Для перевода исследуемых образцов в состояние, характеризующееся фазовым распадом, был выбран метод модификации объемных свойств образцов путем уменьшения содержания атомов кислорода ниже стехиометрического. В [4] было обнаружено фотоиндуцированное переключение пленок $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ в состояние с повышенным сопротивлением и размытым переходом в металлическое состояние. Нами использовалась аналогичная методика, причем модификация свойств пленок $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3/\text{MgO}$ осуществлялась импульсами лазера $\text{Ti} : \text{Al}_2\text{O}_3$ ($\lambda = 780 \text{ nm}$) с длительностью менее 100 фс и частотой повторения 78 МГц при криогенных температурах, что позволило исключить эффекты разогрева образцов и обеспечить однородность их физических свойств при понижении температуры перехода «диэлектрик – металл» до 190 К. Методами рентгенографии установлено отсутствие изменений кристаллографических свойств пленок.

Использованные для исследований тонкие пленки состава $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ выращивались методом лазерного осаждения на подложки MgO. Такое соотношение атомов лантана и кальция обеспечивает наиболее высокую температуру проявления эффекта колоссального магнитосопротивления (КМС) и переход в ферромагнитное металлическое состояние при низких температурах. Измерения сопротивления и магнитосопротивления производились с помощью криогенной установки Cryogenics. Данная система позволяет варьировать температуру образца в интервале от 1,7 до 300 К, а также создавать магнитные поля до 8 Тл. Магнитное поле прикладывалось параллельно к плоскости образца.

При понижении температуры в исходных пленках наблюдался классический переход «диэлектрик – металл», сопровождающийся одновременным упорядочением ориентации спинов e_g -электронов ионов марганца Mn^{3+} , приводящим к переходу из парамагнитного состояния манганита в ферромагнитное.

На рис. 1, а, представлена температурная зависимость сопротивления модифицированной пленки $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ в температурном интервале 3–300 К без магнитного поля (кривая 1) и в магнитном поле с индукцией 8 Тл (кривая 2). В отсутствие магнитного поля модифицированная пленка проявляет максимум сопротивления при температуре $T_M = 212 \text{ K}$, температура наибольшего наклона $\Delta R/\Delta T$, которая соответствует температуре Кюри T_C , составляет 197 К. Второй максимум сопротивления

проявляется при температуре 165 К. Его отсутствие в исходной пленке является косвенным указанием на присутствие нескольких конкурирующих механизмов магнитного упорядочения в модифицированных пленках в результате неоднородного распределения зарядов, вызванного дефицитом кислорода. Приложение внешнего магнитного поля с индукцией $B = 8$ Тл приводит к подавлению этого максимума и смещению основного максимума в сторону высоких температур до 280 К.

Низкотемпературные участки зависимости сопротивления $R(T)$ модифицированной пленки в отсутствие магнитного поля и для четырех значений индукции магнитного поля представлены на рис. 1, б. В случае понижения температуры в отсутствие магнитного поля при $T < 30$ К наблюдается рост сопротивления, тогда как для исходной пленки со стехиометрическим содержанием кислорода данная особенность отсутствовала и зависимость $R(T)$ в области $0 < T < 90$ К хорошо аппроксимировалась выражением [5]

$$R = R_0 + A/\sin h^2(\hbar\omega_s/2k_{\text{Bo}}T) + BT^{9/2},$$

предполагающим одновременное проявление механизмов рассеяния поляронов на мягких оптических фононах и двухмагнного рассеяния. В данном выражении A и B – постоянные; $\hbar = 2\pi\hbar$ – постоянная Планка; ω_s – частота мягкой оптической фононной моды; k_{Bo} – постоянная Больцмана. Отсутствие такой зависимости для модифицированной пленки и изменение наклона $R(T)$ на низкотемпературном участке позволяют предположить, что доминирующим фактором такого сильного изменения характера электропроводности может быть формирование в ферромагнитной матрице кластеров с отличающимся характером магнитного упорядочения (СО/ОО-кластеров) [6].

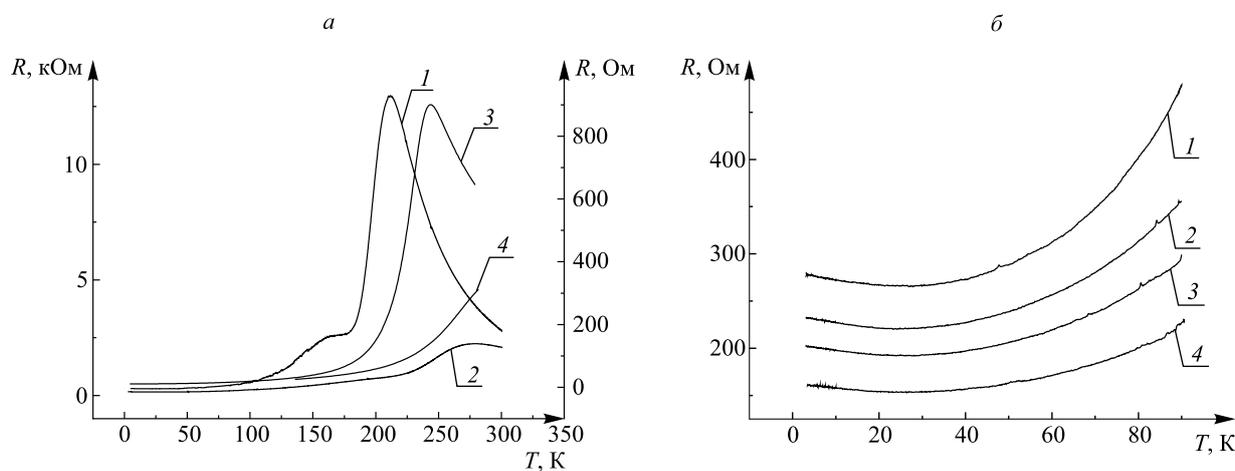


Рис. 1. Температурная зависимость сопротивления $R(T)$ пленки $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$:
 а – в широком температурном интервале для модифицированной (кривые 1, 2) и исходной (кривые 3, 4) пленок (левая и правая шкалы соответственно) для значений индукции магнитного поля B , Тл: 0 (кривые 1, 3) и 8 (кривые 2, 4);
 б – $R(T)$ модифицированной пленки в области низких температур для четырех значений индукции магнитного поля B , Тл: 1 – 0; 2 – 2; 3 – 4; 4 – 8

Приложение магнитного поля, как видно на рис. 2, приводит к существенному уменьшению сопротивления образца на температурном участке с особенностью на кривой $R(T)$, но сама особенность сохраняется и насыщения на кривой магнитосопротивления $R(B)$ не происходит. В то же время при циклическом измерении магнитосопротивления на кривой $R(B)$ наблюдается гистерезис. Для $T = 4$ К (рис. 2, а) сопротивление увеличивается скачком при понижении индукции магнитного поля до значений 0,3 и 0,15 Тл для положительного и отрицательного направления магнитного поля соответственно. Гистерезис магнитосопротивления отмечается для всей температурной области, в которой наблюдается особенность $R(T)$, хотя при повышении температуры скачкообразное изменение сопротивления исчезает (рис. 2, б). Для температур выше 30 К гистерезис отсутствует, что свидетельствует о связи механизмов, ответственных за особенности на кривых $R(T)$ и $R(B)$. Отогрев образцов до 120 К приводил к восстановлению исходного значения сопротивления.

Наблюдаемый гистерезис на кривых $R(B)$ указывает на наличие значительного фазового распада в магнитной системе пленки. Данное предположение подтверждается также представленными на рис. 3 результатами измерения температурной зависимости намагниченности модифицированной пленки $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3/\text{MgO}$ при ее охлаждении в нулевом магнитном поле (ZFC, кривая 1) и при приложении поля (FC, кривая 2). Расхождение этих кривых характерно для состояния спинового стекла, в частности для манганитов с нарушенной стехиометрией [6].

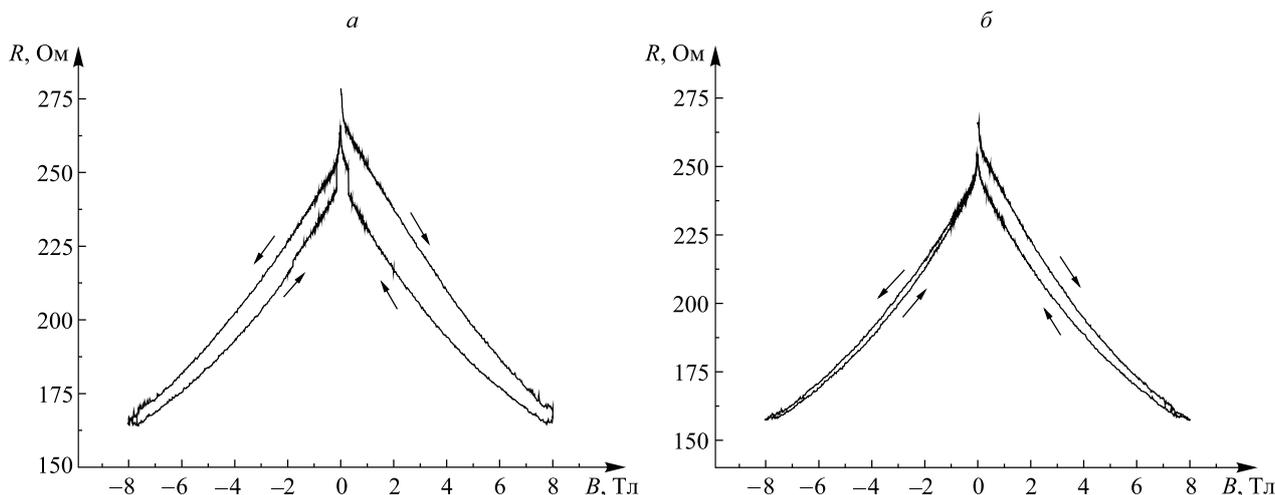


Рис. 2. Магнитосопротивление пленки $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$ при различных T , К:
 а – $T = 4$ К; б – $T = 15$ К.
 Стрелками указано направление изменения магнитного поля

Особенности на зависимости $R(T)$, подобные приведенным на рис. 1, характерны для разупорядоченных металлов при низких температурах и обычно связаны с квантовыми поправками к электропроводности (слабой локализацией (L) и электрон-электронным взаимодействием (I)) [7]. В рамках этих теорий зависимость электропроводности от температуры можно представить в виде $\sigma(T) = \sigma_0 + \Delta\sigma_I(T)$ или $\sigma(T) = \sigma_0 + \Delta\sigma_L(T)$, где зависящие от температуры квантовые поправки $\Delta\sigma_I(T)$ и $\Delta\sigma_L(T)$ к классическому бальцмановскому значению металлической проводимости σ_0 являются следствием проявления эффектов электрон-электронного взаимодействия и слабой локализации соответственно. Вклад от эффекта слабой локализации вследствие процессов когерентного рассеяния в интервале времени между двумя неупругими столкновениями определяется длиной Таулеса $L_{\text{Th}} = (D_i \tau_{\text{in}})^{1/2}$, где τ_{in} – интервал времени между двумя неупругими столкновениями; D_i – коэффициент диффузии. В зависимости от размерности исследуемых систем данный вклад описывается выражениями:

$$\Delta\sigma_L^{3D}(T) = \frac{e^2}{2\pi^2 \hbar L_{\text{Th}}} = \frac{e^2}{2a\pi^2 \hbar} T^{p/2};$$

$$\Delta\sigma_L^{2D}(T) = \frac{e^2}{2\pi^2 \hbar} \ln\left(\frac{1}{L_{\text{Th}}}\right) = \frac{\alpha p e^2}{2\pi^2 \hbar} \ln(T)$$

для трехмерных ($3D$) и двумерных ($2D$) систем соответственно. Коэффициент p принимает значения 1,5; 2 или 3 в зависимости от механизма упругого рассеяния, α и a – подгоночные параметры, e – заряд электрона. Для $2D$ -систем механизм рассеяния не сказывается на характере зависимости квантовой поправки к проводимости.

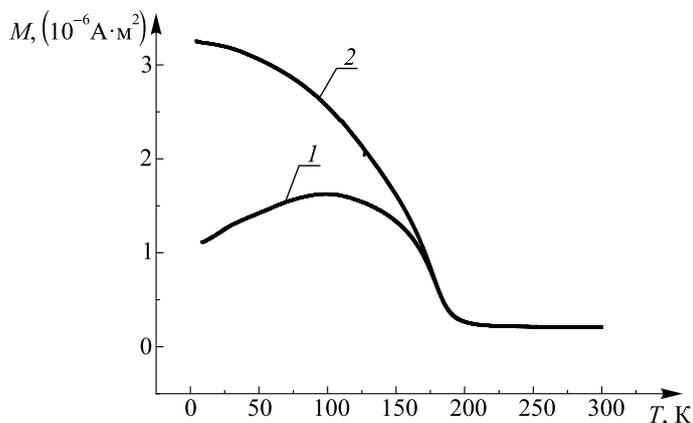


Рис. 3. Температурные зависимости намагниченности пленки $\text{La}_{0,67}\text{Ca}_{0,33}\text{MnO}_3$, снятые в режиме ZFC (кривая 1) и FC (кривая 2)

Поправка, обусловленная электрон-электронным взаимодействием для трехмерного случая передается выражением

$$\Delta\sigma_l^{3D}(T) = \frac{e^2}{4\pi^2\hbar} \frac{1,3}{\sqrt{2}} \left(\frac{4}{3} - \frac{3}{2}F \right) \sqrt{\frac{k_{Bo}T}{\hbar D_i}}, \quad (1)$$

где параметр F описывает степень электронного экранирования. Для случая сильного электронного экранирования, имеющего место в упорядоченных металлах, $F \approx 1$, тогда как при слабом экранировании, что характерно для сильно локализованных систем, $F \approx 0$. Для двумерных систем эта поправка проявляет логарифмическую зависимость, так же как и для эффекта слабой локализации. Характеристическая длина кулоновского взаимодействия для данной поправки описывается выражением $L_C = (\hbar D_i / k_{Bo}T)^{1/2}$.

Однако анализ экспериментальных кривых показывает, что эффекты слабой локализации и электрон-электронного взаимодействия не могут корректно описать особенности температурной зависимости сопротивления при низких температурах по отдельности. В предположение, что расхождение экспериментальных и теоретических кривых обусловлено одновременным проявлением эффектов слабой локализации и электрон-электронного взаимодействия при пониженной размерности, далее для аппроксимации использовались зависимости:

$$\sigma(T) = \sigma_0 + mT^{1/2} + PT^{p/2}; \quad (2)$$

$$\sigma(T) = \sigma_0 + mT^{1/2} + S \ln(T),$$

где m , P и S – подгоночные параметры.

Зависимость (2) при $p = 2$ дает наименьшее среднеквадратичное отклонение точек экспериментальной и расчетной кривых. Вследствие чего можно сделать вывод, что электрон-электронное взаимодействие, так же как и интерференционные эффекты, приводящие к слабой локализации, имеют трехмерный характер. Подтверждением одновременного проявления двух квантовых эффектов может служить зависимость сопротивления пленки от магнитного поля, поскольку приложение магнитного поля не приводит к полному исчезновению особенности на кривой температурной зависимости сопротивления, чего следовало бы ожидать в случае подавления магнитным полем эффекта слабой локализации.

Параметр F в формуле (1) имеет положительное значение, поскольку значение m для аппроксимационной зависимости (2) положительно. В то же время анализ дает для коэффициента F значение, существенно меньшее 1, что свидетельствует о слабости электронного экранирования. Обнаружение квантовых поправок к проводимости при низких температурах и малость значения коэффициента F также логично связать с сильным разупорядочением в электронной системе исследованных манганитов в результате лазерного облучения. Поскольку электронная и спиновая системы в манганитах сильно связаны, мы можем предполагать возможность фазового распада с образованием в ферромагнитной матрице кластеров с орбитальным и зарядовым упорядочением, которым свойствен антиферромагнитный характер спинового упорядочения. Как показывает эксперимент, СО/ОО-кластеры не только не исчезают при низких температурах, но, напротив, стабилизируются. Магнитное взаимодействие кластеров с различным типом магнитного упорядочения приводит к переходу системы в состояние магнитного стекла, что обуславливает наблюдение гистерезиса для кривых магнитосопротивления и температурных зависимостей намагниченности. Приложение магнитного поля приводит к выстраиванию спинов электронов в направлении магнитного поля для кластеров с ферромагнитным типом упорядочения и формированию ферромагнитных кластеров в областях со спиновым разупорядочением. Поскольку вероятность туннелирования электронов для систем с двойным обменом повышается при ферромагнитном типе выстраивания спинов, абсолютное значение сопротивления пленок понижается. Однако полного магнитного упорядочения в рассмотренном диапазоне магнитных полей не происходит, что видно из кривых $R(T)$ (см. рис. 1) и $R(B)$ (см. рис. 2), на основании которых можно сделать заключение о сохраняющемся беспорядке в расположении спинов на пути протекания электрического тока за счет стабильных в магнитном поле СО/ОО-кластеров.

Наличие квантовых поправок к электропроводности в модифицированных манганитах служит прямым подтверждением предположения, что структурный и спиновый беспорядок в объеме пленок является достаточным условием для их наблюдения без необходимости присутствия межкристаллитных границ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Dagotto E.* Nanoscale Phase Separation and Colossal Magnetoresistance. The Physics of Manganites and Related Compounds. Berlin ; Heidelberg, 2002.
2. *Zhenping Chen, Yan Xu, Yuling Su, Shixun Cao, Jincang Zhang.* Resistivity Minimum Behavior and Weak Magnetic Disorder Characteristics in $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ Manganites // J. Superconductivity and Novel Magnetism. 2009. № 11. P. 465–469.

3. Rozenberg E. Comment on 'Resistivity Minimum Behavior and Weak Magnetic Disorder Characteristics in $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$ Manganites' // J. Superconductivity and Novel Magnetism. 2010. № 2. P. 183–186.
4. Moshnyaga V., Giske A., Samwer K., Mishina E., Tamura T., Nakabayashi S., Belenchuk A., Shapoval O., Kulyuk L. Giant negative photoconductivity in $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ thin films // J. Appl. Physics. 2004. № 11. P. 7360–7362.
5. Zhao G., Smolyaninova V., Prellier W., Keller G. Electrical transport in the ferromagnetic state of manganites: small-polaron metallic conduction at low temperatures // Phys. Rev. Letters. 2000. № 26. P. 6086–6089.
6. Troyanchuk I. O., Trukhanov S. V., Szymczak H., Przewoznik J., Barner K. Phase Transitions in $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_{3-x/2}$ Manganites // J. of Experm. and Theoret. Physics. 2001. № 1. P. 161–167.
7. Lee P. A., Ramakrishnan T. V. Disordered electronic systems // Rev. Mod. Physics. 1985. № 2. P. 287–333.

Поступила в редакцию 14.04.2015.

Владимир Адамович Доросинец – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета БГУ.

Иан Цао – магистр кафедры физики полупроводников и наноэлектроники физического факультета БГУ. Научный руководитель – В. Н. Доросинец.

УДК 536.621:579.842.11

А. И. ДРАПЕЗА, В. А. ЛОБАН, Н. В. ПЛЕШКО, Г. А. СКОРОХОД, Е. И. ГУДКОВА

ИМПЕДАНСНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ УСКОРЕННОЙ ОЦЕНКИ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ МИКРООРГАНИЗМОВ

Разработаны импедансные информационные технологии для ускоренной оценки жизнеспособности микроорганизмов, повышающие достоверность оценки жизнеспособности и сокращающие время исследования. На примере бактерий *E. coli* показано, что предложенная информационная технология позволяет достоверно различать между собой контрольные и обработанные дезинфектантом популяции микроорганизмов за время не более 2 ч. Созданные аппаратно-программные средства и информационно-методическое обеспечение могут быть использованы для выявления бактериального загрязнения, установления эффективных режимов использования антимикробных препаратов, при исследовании новых химических соединений на наличие антибактериальной активности.

Ключевые слова: аппаратно-программные средства; импедансные информационные технологии; экспрессная оценка жизнеспособности; бактериальная популяция *E. coli*; дезинфектанты.

The impedance information technologies for the express evaluation of microorganismal vitality with the improved reliability of the microbe vitality estimates and reduced measuring time have been developed. Taking *E. coli* bacteria as an example, it has been demonstrated that the proposed information technologies allow reliable differentiation between the reference microorganism populations and the disinfectant processed populations within 2 hours at most. The developed soft- and hardware together with the proposed technologies may be used to detect bacterial contamination, to suggest effective antimicrobial preparations, and to test new chemical compounds for antibacterial activity.

Key words: soft- and hardware; impedance information technologies; express estimation of microbial vitality; *E. coli* bacterial population; disinfectants.

В последние годы востребованность метода импедансной электрохимической спектроскопии (ИЭС) для экспрессной оценки жизнеспособности различных видов микробных популяций значительно возросла. В отличие от методов традиционной импедансометрии ИЭС обладает более высокой информативностью в раскрытии свойств изучаемой системы и механизма процессов, которые в ней протекают, а также более высокой экспериментальной эффективностью, позволяющей получить достаточно большой объем нетривиальной информации об изучаемом объекте по сравнению с затратами на автоматизацию эксперимента. Многоканальная реализация метода ИЭС открывает широкие возможности (в рамках одного эксперимента) для исследования во взаимосвязи со свойствами различных типов микроорганизмов, питательных сред, фарадеевских и нефарадеевских датчиков различного конструктивного исполнения, механизмов переноса заряда на фазовых границах раздела «электрод/электролит». Импедансная спектроскопия позволяет исследовать свойства поверхности электродов и устанавливать механизм электрохимических реакций, протекающих на их поверхности [1–4].

Суть метода ИЭС основана на подаче возмущающего воздействия в виде синусоидального напряжения малой амплитуды и измерении на выходе системы отклика тока, вызванного данным возмущением. Требования к ограничению значения величины возмущающего систему фактора связаны с обеспечением условий для интерпретации результатов измерения в терминах теории линейных систем [1, р. 40]. Получаемые при этом в широкой частотной области комплексные импедансные данные анализируются на уровне комплексных величин импеданса, адмиттанса, диэлектрической проницаемости и электрического модуля в целях полного понимания процессов в исследуемой системе. Для интерпретации экспериментальных данных, полученных методом ИЭС, могут быть использованы как аналоговые, так и физические модели. Формой представления аналоговых моделей являются электрические эквивалентные схемы, с помощью которых фактически отражаются происходящие в инокулированной среде ячейки