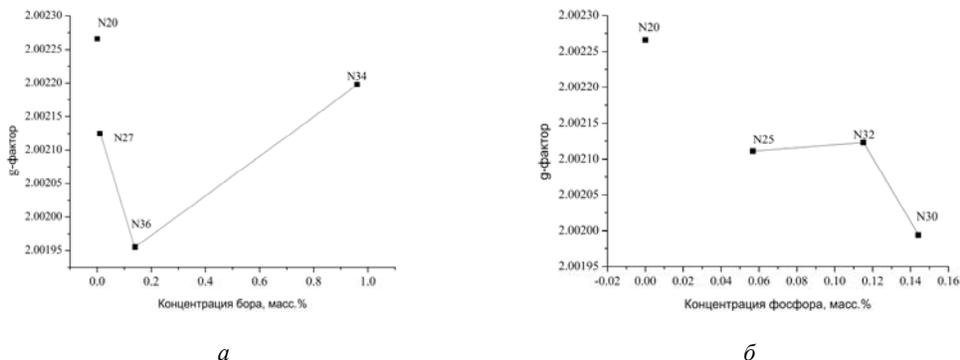


фосфором образцах:  $(8,3-8,8) \pm 0,05$  Гс. Обнаружено, что легирование примесями приводит к сужению сигнала ЭПР в порошках наноалмаза.



**Рисунок 3 – Зависимость g-фактора сигнала ЭПР порошка наноалмаза от концентрации бора (а) и фосфора (б), введенных в ДНА в процессе ударно-волнового синтеза**

Таким образом, метод ЭПР может быть использован для диагностики эффективности изменения легирующей примесью числа нескомпенсированных магнитных моментов электронов в ДНА и установления оптимальных режимов их легирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Erwin Steven C. Doping semiconductor nanocrystals / Steven C. Erwin, Lijun Zu, Michael I. Haftel, Alexander L. Efros, Thomas A. Kennedy & David J. Norris // Nature 436, 91-94 (7 July 2005).
2. Чепугов, А.П. Легированные бором монокристаллы алмаза для зондов высоковакуумной туннельной микроскопии / А.П. Чепугов, А.Н. Чайка, В.И. Грушко, Е.И., Мицкевич, О.Г. Лысенко // Сверхтвердые материалы. – 2013. – №3 – С. 29–37.
3. Koizumi S., Kamo M., Sato Y.; Ozaki H., Inuzuka T., Growth and characterization of phosphorus doped {111} homoepitaxial diamond thin film / Koizumi S., Kamo M., Sato Y.; Ozaki H., Inuzuka T // Appl. Phys. Lett., 1997, 71, P. 1065–1067.
4. A Study of Defects and Impurities in Doped Detonation Nanodiamonds by EPR, Raman Scattering, and XRD Methods. V. Yu. Dolmatov, N. M. Lapchuk, T. M. Lapchuk, B. T. T. Nguyen, V. Myllymaki, A. Vehanen, and R. Yu. Yakovlev/ Journal of Supperhard Materials, 2016, Vol. 38, No. 4, pp. 3-16.

### КОНКУРЕНЦИЯ МЕХАНИЗМОВ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ В РАЗУПОРЯДОЧЕННЫХ МАНГАНИТАХ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

**В. А. Доросинец, М. С. Керимова**

*Белорусский государственный университет, dorosinets@bsu.by*

Манганиты, проявляющие эффект колоссального магнитосопротивления, интенсивно исследуются на протяжении последних десятилетий. Сложный характер взаимодействия электронной, спиновой и фононной подсистем приводит к возникновению в них разнообразных форм магнитного упорядочения, проявлению различных механизмов электропроводности и их взаимодействия. Указанные особенности объ-

ясняют и факт того, что механизмы электропроводности для манганитов слабо изучены за исключением нескольких предельных случаев. Так, в ряде работ наблюдалось отклонение зависимости сопротивления от температуры  $R(T)$  от типичного, характеризующегося насыщением сопротивления при переходе в металлическое состояние при низких температурах. Для объяснения такой аномалии предполагались различные механизмы, в частности, квантовые поправки к электропроводности, эффект Кондо и др. [1]. Однако данные образцы были преимущественно плохого качества с дефектами структуры, что позволило ряду авторов интерпретировать результаты наличием границ зерен [2].

Целью данного исследования было установление основных механизмов электропроводности для образцов с низкотемпературными особенностями на  $R(T)$ , и их отличия от механизмов, характерных для случая классического поведения  $R(T)$ . Для чистоты эксперимента были получены тонкие пленки  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$  толщиной 200 нм, выращенные на подложках из MgO (LCMO/MgO), обладающие высокой степенью структурного совершенства и, соответственно высокой температурой перехода диэлектрик-металл ( $T_{DM} = 230$  К). Далее образцы подвергались лазерной обработке, приводящей к уменьшению содержания кислорода и понижению температуры на 40-50 К. Метод лазерной обработки позволяет исключить эффекты разогрева образцов и обеспечить однородность физических свойств модифицированных пленок. Уменьшение концентрации кислорода подавляет механизм двойного обменного взаимодействия и, как следствие, уменьшает концентрацию носителей заряда на уровне Ферми, создавая условия для диффузного характера электронного транспорта.

На кривых  $R(T)$  модифицированных пленок LСМО (рис. 1) в низкотемпературной области наблюдался минимум с инверсией знака температурного коэффициента сопротивления, аналогично как для образцов в вышеуказанных литературных источниках. Отсутствие в модифицированных пленках межзеренных границ позволило исключить их влияние на электропроводность и проверить корректность использования квантовых поправок для интерпретации низкотемпературных особенностей на кривых  $R(T)$ , а также установить роль вкладов от двухмагнетонного рассеяния и рассеяния поляронов на мягкой фононной моде – основных механизмов рассеяния для пленок LСМО стехиометрического состава.

Измерение сопротивления производилось на криогенной установке Cryogenics. Данная система позволяет варьировать температуру образца в интервале от 3 К до 300 К, а так же создавать магнитные поля до 8 Тл. Магнитное поле прикладывалось параллельно к плоскости образца.

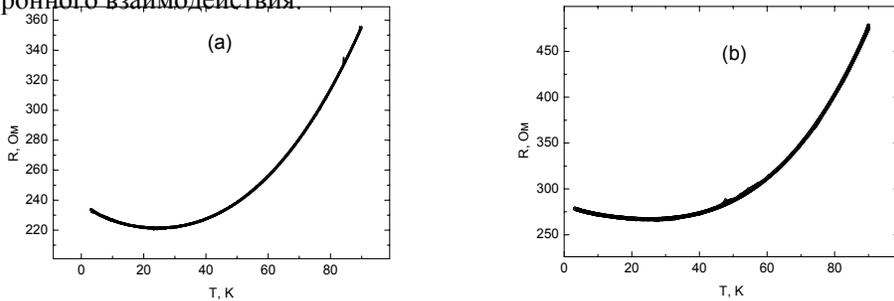
На рис. 1 представлены низкотемпературные участки кривых  $R(T)$  модифицированных пленок для двух значений индукции магнитного поля. Практическое отсутствие влияния магнитного поля на вид кривой  $R(T)$  в температурной области наблюдения особенностей ( $T < T_M = 28$  К) позволяет заключить, о незначительном вкладе механизма слабой локализации в проявлении рассматриваемых особенностей, вследствие чего экспериментальные кривые  $R(T)$  для модифицированных тонких пленок LСМО интерпретируются в модели квантовых поправок к электропроводности за счет электрон-электронного взаимодействия (межэлектронной интерференции) [3].

В данном случае для удельного сопротивления  $\rho$  выполняется следующая формула:

$$\rho = \frac{1}{\sigma_0 + MT^{\frac{1}{2}}} + \rho_n T^n \quad (1)$$

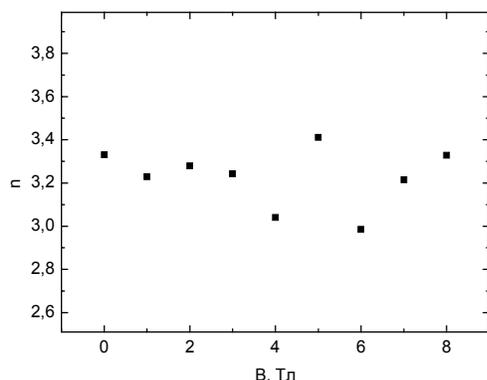
Первый компонент формулы описывает вклад в удельное сопротивление за счет электрон-электронного взаимодействия, доминирующий при температурах ниже  $T_M$ , в то время как степенная зависимость от температуры представляет вклад от неупругого рассеяния носителей заряда, доминирующий в температурном интервале выше  $T_M$ .

На рис. 1 приведена также аппроксимация экспериментальных результатов формулой (1) в интервале температур 3–90 К. Теоретическая кривая хорошо согласуется с экспериментальными данными. Анализировался также характер зависимости параметров аппроксимации от величины индукции магнитного поля. В частности, на рис. 2 представлена зависимость показателя степени  $n$  от индукции магнитного поля. Видно, что данный параметр не зависит от магнитного поля, как и предполагается в рамках рассматриваемой модели, в пределах ошибки, определяемой точностью измерения сопротивления и расчета параметров. Отсутствие существенной зависимости рассчитанных значений параметра  $M$  от магнитного поля является подтверждением сделанного предположения о возможности пренебрежения вкладом от слабой локализации и учета лишь электрон-электронного взаимодействия.



**Рисунок 1.** – Температурная зависимость сопротивления  $R(T)$  модифицированной пленки  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$  для низких температур и ее аппроксимация формулой (1) для значений индукции магнитного поля:  $a - 2$  Тл,  $b - 8$  Тл

Чтобы исключить вероятность того, что результат аппроксимации возможно имеет случайный характер, обусловленный подбором параметров для заданного интервала температур, аппроксимация формулой (1) проводилась для ряда температурных интервалов с последовательным уменьшением верхней границы интервала (70 и 50 К). Было установлено, что в пределах ошибки разброс значений подгоночных параметров не зависит от использованного диапазона аппроксимации, что является дополнительным подтверждением корректности использования формулы (1).



**Рисунок 2.** – Зависимость значения показателя  $n$  в формуле (1) от индукции магнитного поля для модифицированной пленки  $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$

температуры с показателем степени близким к значению  $n$  в формуле (1).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Resistivity Minimum Behavior and Weak Magnetic Disorder Characteristics in  $\text{La}_{2/3}\text{Ca}_{1/3}\text{MnO}_3$  Manganites / Z.Chen [et al.] // J. Supercond. Nov. Magn. 2009. Vol. 22. P.465.
2. 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’ / E. Rozenberg // J. Supercond. Nov. Magn. 2010. Vol. 23. P. 183.
3. Гантмахер В.Ф. Электроны в неупорядоченных средах / В.Ф. Гантмахер. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 288 с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ ПЕРЕНОСЕ В КОРОТКОКАНАЛЬНЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРАХ

О. Г. Жевняк

*Белорусский государственный университет, zhevnyakol@tut.by*

С помощью кинетического метода Монте-Карло осуществлено моделирование электронного переноса в короткоканальных МОП-транзисторах с мелкими и глубоко залегающими стоками. Рассчитаны зависимости средних значений энергии, подвижности и дрейфовой скорости электронов вдоль проводящего канала транзистора в зависимости от напряжений на стоке и затворе. Показано, что глубина залегания стока не оказывает сильного влияния на перенос электронов.

Тенденции развития современной цифровой электроники направлены на уменьшение размеров МОП-транзисторов, являющихся базовыми элементами микропроцессорных систем, как в продольном, так и в поперечном направлениях. Это требует сокращения и длины проводящего канала транзисторов, и глубины их залегания в подложку. Последнее достигается созданием мелких стоков – глубиной 10–20 нм [1; 2]. Но в отличие от стандартных МОП-транзисторов с глубиной стоковой и истоковой областей до 100 и более нм перенос в транзисторах с мелкими стоками приоб-