

Композитные керамические материалы с отрицательной и положительной магниторезистивностью на основе $\text{La}_{0,67}\text{Sr}_{0,33}\text{MnO}_3$

Ю.В. Кабиров¹, В.Г. Гавриляченко¹, А.С. Богатин¹,

Т.И. Чупахина², Е.В. Чебанова³, Е.Б. Русакова³

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

²Институт химии твердого тела УрО РАН, Екатеринбург

³Ростовский государственный строительный университет

Аннотация: Манганит лантана стронция $\text{La}_{0,67}\text{Sr}_{0,33}\text{MnO}_3$, обладающий высокой спиновой поляризацией носителей, использован для создания композитных материалов с различными барьерными веществами - GeO_2 , $\text{Li}_4\text{P}_2\text{O}_7$, С. Исследованы магниторезистивные свойства синтезированной керамики при комнатной температуре. Значения отрицательной изотропной магниторезистивности для образцов с оксидом германия при комнатных температурах в магнитном поле 18 кОе достигают 15 %, с барьерами из пирофосфата лития - 16 %. Образцы с содержанием графита 10-85% проявляют положительную магниторезистивность до 15 % в поле 15 кОе.

Ключевые слова: манганит лантана стронция, композитный материал, керамика, магниторезистивность, рентгеновская дифракция, микроструктура, барьерный слой, туннелирование, перколяционный переход, спиновая поляризация, эффект Зеебека.

Введение

Микрокристаллическое строение гранулированных пленок и керамики – ферромагнитные кристаллиты и немагнитная прослойка – представляет собой прекрасную возможность для формирования магнитных туннельных контактов [1 – 11], в том числе и на основе манганитов. Туннельные контакты такого рода интересны тем, что в них возможно усиление слабополевой отрицательной магниторезистивности (LFMR) [5 – 19]. К таким системам относятся керамика $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ (LSMO) и композиты на ее основе, в которых в качестве второй фазы используются диэлектрики, заполняющие межкристаллитное пространство [3 – 19]. При этом в случае керамических композитов для создания барьерных границ между кристаллитами (LSMO) применяются различные соединения: Ta_2O_5 , La_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , CuO , ZnO , NiO , CeO_2 , Sb_2O_5 , Sb_2O_3 , SrTiO_3 , SrZrO_3 , TiO_2 , CuFe_2O_4 , ZnFe_2O_4 , $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ [5 – 19]. Как отмечается в [17], барьерные слои

играют отнюдь не пассивную роль туннельного барьера, но и активную. Наибольшее влияние на величину магниторезистивности (и ее знак) оказывает контактная прослойка между немагнитной компонентой и LSMO. Помимо отрицательной туннельной магниторезистивности, представляет интерес изотропная положительная магниторезистивность (PMR) – увеличение электросопротивления во внешнем магнитном поле. Физические причины PMR в различных соединениях (C, Ag₂Se, Ag₂Te и других), активно исследуются [1, 2, 20 – 29].

Целью работы является исследование влияния некоторых барьерных материалов на магниторезистивность в двухфазных композитных материалах (La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃)/I, где I – барьерное соединение: GeO₂, Li₄P₂O₇, C (графит).

Методика эксперимента

Для синтеза композитов в стехиометрическую смесь La₂O₃, SrCO₃, Mn₂O₃ состава La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ мы вводили добавки оксида германия GeO₂ (или пирофосфата лития Li₄P₂O₇) (5 – 35 % по массе). После измельчения и гомогенизации прессованные таблетки диаметром 8 мм и толщиной 2 мм выдерживались для синтеза при температуре 1100°C в течение 4 часов с последующим медленным охлаждением. Для приготовления образцов LSMO/C в графит добавлялся заранее приготовленный LSMO от 5 до 85 % по массе. После гомогенизации из смеси под давлением 100 МПа прессовались таблетки диаметром 10 мм и толщиной 2 мм. После этого следовал отжиг при температуре 550°C в течение 2 часов. Приготовленные образцы тестировались на дифрактометре ARL-X'TRA с помощью излучения CuK_α анода с длиной волны 1,5406 Å. Обработку рентгенограмм осуществляли полнопрофильным методом Ритвельда. Микроструктура поверхности керамики исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа Zeiss Supra 25. Electrodes на развитые поверхности образцов наносились методом вжигания серебряной пасты при 500°C. Измерение сопротивления

образцов проводилось по двухэлектродной схеме методом вольтметра-амперметра на постоянном токе в магнитном поле $0 - 18 \text{ kOe}$ при комнатной температуре. Магниторезистивность MR рассчитывалась по формуле:

$$MR = \frac{R(0) - R(H)}{R(0)} \cdot 100\% \quad (1),$$

где $R(0)$ – сопротивление образца без поля, $R(H)$ – сопротивление образца в магнитном поле.

Результаты исследований и их обсуждение

Рентгендифракционные исследования приготовленных образцов с барьерным веществом из оксида германия (материал 1 типа) или $\text{Li}_4\text{P}_2\text{O}_7$ (материал 2 типа) помимо основного компонента LSMO показали наличие в них оксида GeO_2 или LiPO_3 , $\text{Li}_4\text{P}_2\text{O}_7$, LaPO_4 соответственно. В случае материалов с графитом – на рентгенограммах видны отражения LSMO и графита.

На рис.1 показана морфология поверхности материала $80\%\text{La}_{0,67}\text{Sr}_{0,33}\text{MnO}_3/20\%\text{GeO}_2$.

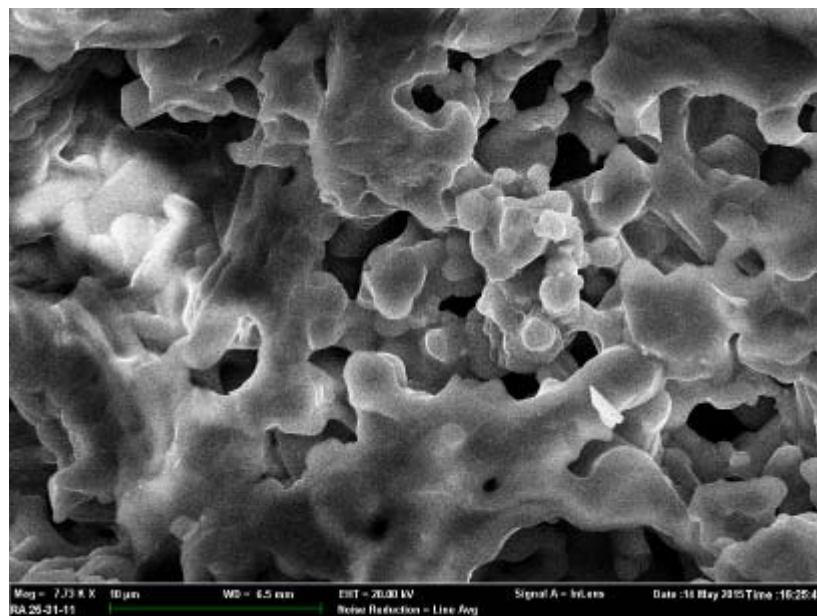


Рис. 1. – Sem-изображение поверхности скола образца $85\%\text{La}_{0,67}\text{Sr}_{0,33}\text{MnO}_3/20\%\text{GeO}_2$

Средний размер частиц манганита 5 – 6 мкм. При этом микрочастицы LSMO окутаны аморфным стеклообразным оксидом германия. Аналогичная морфология поверхности наблюдается и у образцов LSMO/Li₄P₂O₇.

Значения отрицательной магниторезистивности при комнатной температуре для образцов 80%La_{0,67}Sr_{0,33}MnO₃/20%GeO₂ и 85%LSMO/15%Li₄P₂O₇ в зависимости от напряженности магнитного поля приведены на рис.2.

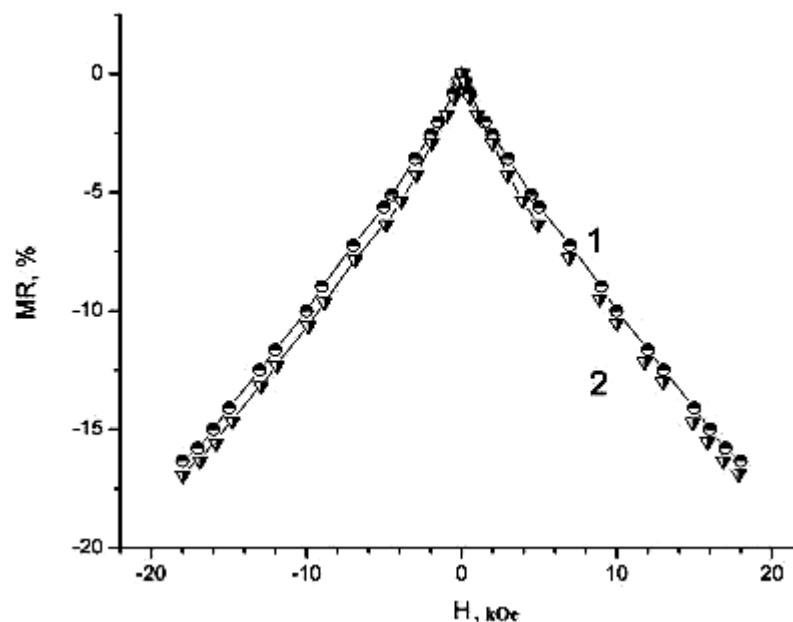


Рис. 2. – Зависимости магниторезистивности от напряженности магнитного поля для образцов композита 80%LSMO/20%GeO₂ (1) и 85%LSMO/15%Li₄P₂O₇ (2)

Следует отметить изотропность *MR* для таких материалов, а также характер зависимости *MR* от *H*, близкий к линейному.

В зависимости электрического сопротивления образцов композита 1-го типа от концентрации (*N*) стеклообразующего компонента наблюдается резкий рост сопротивления при *N* > 25%. Этот факт свидетельствует о существовании перколяционной границы вблизи указанной концентрации

GeO₂. Отметим также, что при увеличении концентрации GeO₂ меняется тип проводимости с *p* – типа на *n* – тип при $N = 25 \%$. В образцах композита типа 2 не наблюдается признака перколяционного перехода, что, вероятно, связано с высокой ионной проводимостью пирофосфата лития [11].

Для образцов LSMO/C с помощью эффекта Зеебека определен преобладающий тип проводимости для каждого образца. Образцы чистого синтетического графита представляют собой скомпенсированный полупроводник. Однако, для композитов, начиная с 5 % добавки LSMO характерен *n* – тип проводимости. Микроструктура поверхности образца графита без добавок представлена на рис.3.

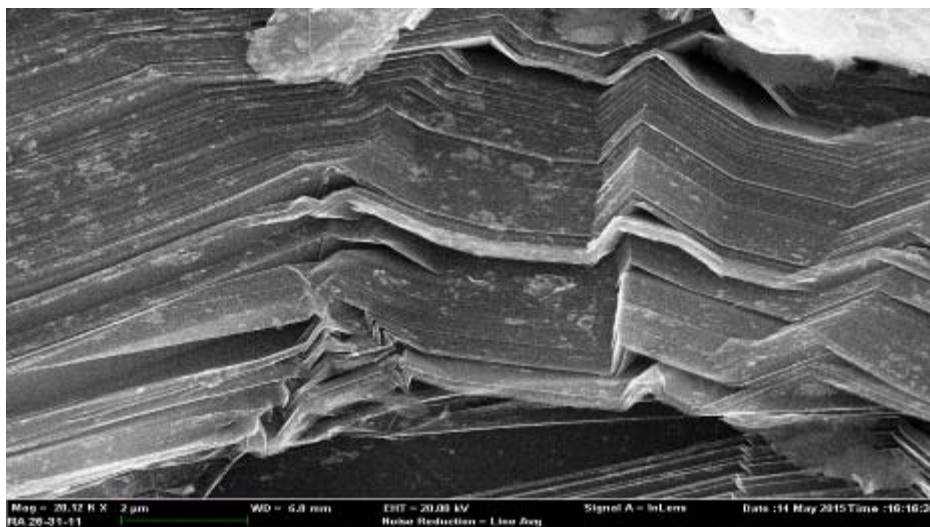


Рис. 3. – SEM-микрофотография поверхности образца чистого графита

Средний размер частиц графита около 40 мкм, а для кристаллитов LSMO около 1 – 2 мкм. В доперколяционном образце (20 % LSMO) частицы LSMO расположены неупорядоченно и не составляют сплошную проводящую сетку. Как показывают результаты измерений магниторезистивности, для различных соотношений компонент проявляются оптимальные соотношения. Значения магниторезистивности в поле 15 *kOe* при различной концентрации LSMO в графите представлены в таблице №1.

Для композитов с концентрацией 50%-60 % LSMO в графите, вероятно, отражается размытый порог перколяции для наших образцов. В качестве характерного признака порога перколяции следует отметить, что в области концентраций LSMO более 70 % происходит смена знака температурного коэффициента сопротивления: с положительного на отрицательный.

Таблица № 1

Магниторезистивность приготовленных образцов в зависимости содержания от LSMO в графите при комнатной температуре

LSMO, %	MR, %
0	6
5	6.5
10	5.1
15	7
20	7
25	7
30	8
40	11
50	15
60	15
70	12
80	5
85	4

На рис.4 показана характерная зависимость магниторезистивности от напряженности магнитного поля. Следует отметить близкую к линейной зависимость $MR(H)$. Во внешнем магнитном поле возможно существование нескольких конкурирующих процессов, обуславливающих эффекты магниторезистивности с различными знаками. Это классическая «ординарная» магниторезистивность, связанная с лоренцевским изменением траектории носителей. Она имеет положительный знак. Поскольку толщины барьеров между FM кристаллитами LSMO меняются от нуля до 30 мкм, нельзя исключить существование квантовомеханического туннельного

магниторезистивного эффекта. Туннельная MR дает отрицательный вклад в суммарную магниторезистивность. В случае использования спин-поляризованных электронов локальные диамагнитные поля атомов графита [27], ориентированные против внешнего магнитного поля, оказывают рассеивающее воздействие на потоки «мажорных» носителей, источником которых являются гранулы LSMO.

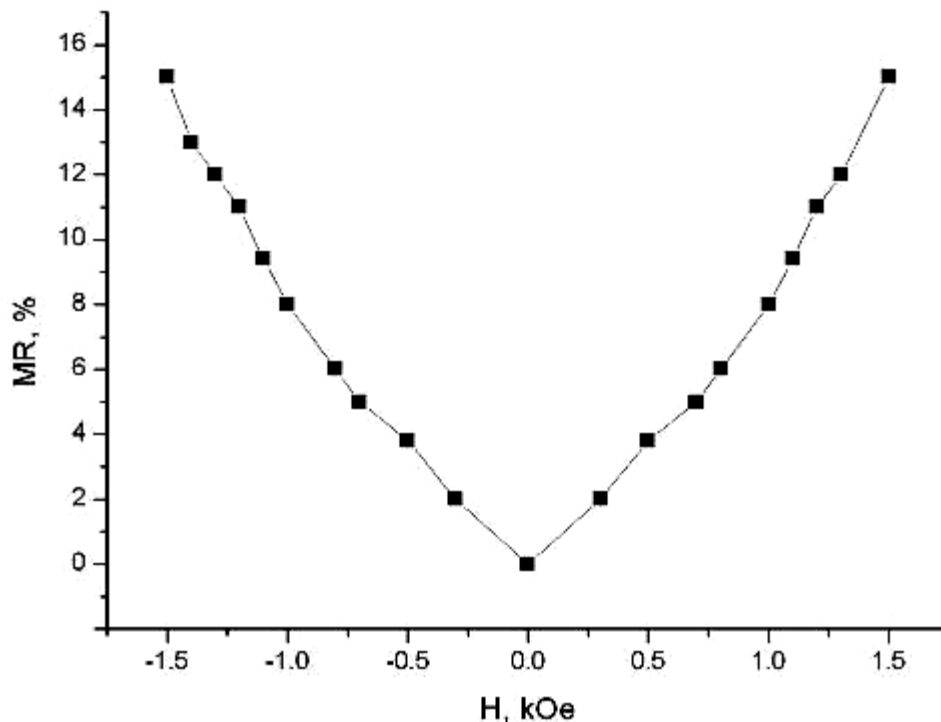


Рис. 4. – Зависимость магниторезистивности композита 60%LSMO/40%C от напряженности магнитного поля

Важно отметить, что при этом вклад локальных диамагнитных полей прямо пропорционален напряженности внешнего поля, что отражается на характере зависимости магниторезистивности от напряженности магнитного поля. Вследствие этого с увеличением напряженности магнитного поля проводимость композита линейно уменьшается. Комбинация веществ LSMO/C, вероятно, работает как эффективный спиновый фильтр, не пропускающая (в идеале) ни «минорные» носители, подавляемые в LSMO, ни

«мажорные», рассеиваемые графитом. Как выясняется, этот эффект особенно ярко проявляется вблизи порога перколяции LSMO/C.

Интересно отметить, то композиты, состоящие из сверхпроводящих слоев $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}$ или YBCO и LSMO, проявляют существенную *PMR* [28, 29] при низких температурах. Авторы [29, 30] связывают это явление с разрывом куперовских пар электронов, отмечая мощный диамагнетизм сверхпроводников.

Использованная технология позволяет получить материалы с отрицательной магниторезистивностью с барьерами из GeO_2 (или $\text{Li}_4\text{P}_2\text{O}_7$) в «один шаг», так как стадия синтеза LSMO в присутствии этих стеклообразующих добавок объединена со спеканием керамики. Также в нашей работе показана возможность получения высоких значений положительной магниторезистивности при комнатной температуре в слабых магнитных полях с помощью использования LSMO, обладающего почти стопроцентной спиновой поляризацией носителей, и матрицы из графита.

Отметим, что исследования композитов $(\text{La}_{0,67}\text{Sr}_{0,33}\text{MnO}_3)/I$ с различными барьерными веществами далеки от завершения. Вполне возможно, что графит – не единственное барьерное соединение, позволяющее проявиться положительной магниторезистивности в композитных материалах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14-03-00103А.

Литература

1. Gerber A., Milner A., Groisman B., Karpovsky M., and Gladkikh A. Magnetoresistance of granular ferromagnets // Phys. Rev. B. 1997. V. 55. №10. pp. 6446 – 6452.
2. Гриднев С.А., Калинин Ю.Е., Ситников А.В., Стогней О.В. Нелинейные явления в нано - и микрогетерогенных системах. М.: Бином, 2012. 352 с.



3. Волков Н.В. Спинтроника: магнитные туннельные структуры на основе манганитов // УФН. 2012. Т. 183. С. 263 – 285.
4. Meservey R. and Tedrow P.M. Spin-polarized electron tunneling // Physics Reports. 1994. V. 238. pp. 173 – 243.
5. Yang X.S., Yang Y., He W., heng C.H. and Zhao Y. Low-field magnetoresistance in $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{Ta}_2\text{O}_5$ composites // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. pp. 115009 – 115014.
6. Kim H.-J., Yoo S.-I. Enhanced low field magnetoresistance in $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3\text{-La}_2\text{O}_3$ composites // J. of Alloys and Comp. 2012. V. 521. pp. 30 – 34.
7. Gupta S., Ranjit R., Mitra C., Raychaudhuri P., Pinto R. Enhanced room-temperature magnetoresistance in $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3\text{-glass}$ composites // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 78. №3. pp. 362 – 364.
8. Zhou Zh.-Yu., Wu X.-Sh., Luo G.-Sh., Jiang F.-Y. Effect of second introduced phase on magnetotransport properties of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/0.33(\text{CuO}, \text{ZnO}, \text{Al}_2\text{O}_3)$ composites // Trans. nonferrous met. Soc. China. 2008. V. 18. pp. 890 – 896.
9. Gaur A., Varma G.D. Magnetoresistance behaviour of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{NiO}$ composites // Solid State Communications. 2006. V. 139. pp. 310 – 314.
10. Balcells Ll., Carrillo A.E., Martinez B., and Fontcuberta J. Enhanced field sensitivity close to percolation in magnetoresistive $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3/\text{CeO}_2$ composites // Appl. Phys. Lett. 1999. V. 74. №26. pp. 4014 – 4016.
11. Miao J.-H., Yuan S.-L., Ren G.-M., Xiao X., Yu G.-Q., Wang Y.-Q. and Yin Sh.-Y. Enhancement of room temperature magnetoresistance in $(1-x)\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3/x\text{Sb}_2\text{O}_5$ composites // J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. V. 39. pp. 2897 – 2901.
12. Кабиров Ю.В., Гавриляченко В.Г., Богатин А.С., Чупахина Т.И., Гавриляченко Т.В. Магниторезистивность стеклокомпозитов

$\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3/\text{Sb}_2\text{O}_3$ при комнатной температуре // ФТТ. 2015. Т. 57. В. 1. С. 16 – 18.

13. Shlyakhtin O.A., Shin K.H., and Oh Y.-J. Enhancement of low field magnetoresistance by chemical interaction in bulk composites $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3/\text{SrMeO}_3$ (Me = Ti, Zr). J. Appl. Phys. 2002. V. 91. №10. pp. 7403 – 7405.

14. Gaur A. and Varma G.D. Electrical and magnetotransport properties of $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3/\text{TiO}_2$ composites // Cryst. Res. Technol. 2007. V. 42. №2. pp. 164 – 168.

15. Seo Y.J., Kim G.W., Sung C.H., Lee C.G. and Koo B.H. Magnetic and electrical transport properties on $(\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3)_{1-x}/(\text{CuFe}_2\text{O}_4)_x$ composites // J. Phys.: Conference Series. 2011. V. 266. pp. 1 – 6.

16. Zi Zh., Fu Y., Liu Q., Dai J., Sun Y. Enhanced low-field magnetoresistance in LSMO/SFO composite system // J. Magn. Magn. Mater. 2012. V. 324. pp. 1117 – 1121.

17. De Teresa J.M., Barthélémy A., Fert A., Contour J.P., Lyonnet R., Montaigne F., Seneor P., and Vaurès A. Inverse tunnel magnetoresistance in $\text{Co}/\text{SrTiO}_3/\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$: new ideas on spin-polarized tunneling // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82. pp. 4288 – 4291.

18. Кабиров Ю.В., Гавриляченко В.Г., Богатин А.С., Чупахина Т.И., Русакова Е.Б., Чебанова Е.В. Стеклокомпозиты на основе магнитного полупроводника $\text{La}_{0,67}\text{Sr}_{0,33}\text{MnO}_3$ как функциональные материалы // Инженерный вестник Дона, 2014, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2605.

19. Фиговский О. Новейшие нанотехнологии // Инженерный вестник Дона, 2012, №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/725/.

20. Alekseev P.S., Dmitriev A.P., Gornyi I.V., Kachorovskii V.Yu., Narozhnyi B.N., Schütt M., and Titov M. Magnetoresistance in two-component systems // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 114. pp. 156601 – 156601 – 6.
 21. Zhang X., Xue Q.Z., Zhu D.D. Positive and negative linear magnetoresistance of graphite // *Phys. Lett. A.* 2004. V. 320. pp. 471 – 477.
 22. Mandal G., Srinivas V., Rao V.V. Role of particle size on the magnetoresistance of nano-crystalline graphite // *Carbon.* 2013. V. 57. pp. 139 – 145.
 23. Lee M., Rosenbaum T.F., Saboungi M.L., Schnyders H.S. Band-gap tuning and Linear magnetoresistance in the silver chalcogenides // *Phys. Rev. Lett.* 2002. V. 88. pp. 066602 – 066602 – 4.
 24. Xue Q.Z., Zhang X., Zhu D.D. Positive linear magnetoresistance in $\text{Fe}_x - \text{C}_{1-x}$ composites // *J Magn Magn Mater.* 2004. V. 270. pp. 397 – 402.
 25. Xue Q.Z., Zhang X., Zhu D.D. Room-temperature positive magnetoresistance in micro-sized $\text{Co}_x - \text{C}_{1-x}$ composites // *Physica B.* 2003. V. 334. pp. 216 – 220.
 26. Xue Q.Z., Zhang X. Positive magnetoresistance in micro-sized granular $\text{Ni}_x - \text{C}_{1-x}$ composites // *Phys. Lett. A.* 2003. V. 313. pp. 461 – 466.
 27. Макарова Т.Л. Магнитные свойства углеродных структур // *Физика и техника полупроводников.* 2004. Т. 38. Вып. 6. С. 641 – 664.
 28. Paredes O., Moran O., Fuchs D. and Baca E. Negative and positive magnetoresistance in thick films of $(\text{Bi-2223})_{0.95}(\text{LSMO})_{0.05}/\text{LaAlO}_3$ composites // *Revista Mexicana de Fisica.* 2012. V. 58(2). pp. 1 – 3.
 29. Lin Y.B., Huang Z.G., Yang Y.M., Wang S., Li S.D., Zhang F.M., Du Y.W. Giant positive magnetoresistance in heterostructure $(\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3)$ coated with $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ composites // *Appl. Phys. A.* 2011. V. 104. pp. 143 – 147.
-

References

1. Gerber A., Milner A., Groisman B., Karpovsky M., and Gladkikh A. Phys. Rev. B. 1997. v. 55. № 10. pp. 6446 – 6452.
2. Gridnev S.A., Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V., Stogney O.V. Nelineynye yavleniya v nano- i mikroheterogennykh sistemakh. [Nonlinear phenomena in nano - and microheterogeneous systems]. M.: Binom, 2012. 352 p.
3. Volkov N.V. UFN. 2012. v. 183. pp. 263 – 285.
4. Meservey R. and Tedrow P.M. Physics Reports. 1994. v. 238. pp. 173 – 243.
5. Yang X.S., ang Y., He W., Cheng C.H. and Zhao Y.J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. v. 41. pp. 115009 – 115014.
6. Kim H.-J., Yoo S.-I. J. of Alloys and Comp. 2012. v. 521. pp. 30 – 34.
7. Gupta S., Ranjit R., Mitra C., Raychaudhuri P., Pinto R. Appl. Phys. Lett. 2001. v. 78. №3. pp. 362 – 364.
8. Zhou Zh.-Yu., Wu X.-Sh., Luo G.-Sh., Jiang F.-Y. Trans. nonferrous met. Soc. China. 2008. v. 18. pp. 890 – 896.
9. Gaur A., Varma G.D. Solid State Communications. 2006. v. 139. pp. 310 – 314.
10. Balcells Ll., Carrillo A.E., Martinez B., and Fontcuberta J. Appl. Phys. Lett. 1999. v. 74. №26. pp. 4014 – 4016.
11. Miao J.-H., Yuan S.-L., Ren G.-M., Xiao X., Yu G.-Q., Wang Y.-Q. and Yin Sh.-Y. J. Phys. D: Appl. Phys. 2006. v. 39. pp. 2897 – 2901.
12. Kabirov Yu.V., Gavriyachenko V.G., Bogatin A.S., Chupakhina T.I., Gavriyachenko T.V. FTT. 2015. v. 57(1). pp. 16 – 18.
13. Shlyakhtin O.A., Shin K.H., and Oh Y.-J. J. Appl. Phys. 2002. v. 91. №10. pp. 7403 – 7405.
14. Gaur A. and Varma G.D. Cryst. Res. Technol. 2007. v. 42. №2. pp. 164 – 168.



15. Seo Y.J., Kim G.W., Sung C.H., Lee C.G. and Koo B.H. J. Phys.: Conference Series. 2011. v. 266. pp. 1 – 6.
 16. Zi Zh., Fu Y., Liu Q., Dai J., Sun Y. J. Magn. Magn. Mater. 2012. v. 324. pp. 1117 – 1121.
 17. De Teresa J.M., Barthélémy A., Fert A., Contour J.P., Lyonnet R., Montaigne F., Seneor P., and Vaurès A. Phys. Rev. Lett. 1999. v. 82. pp. 4288 – 4291.
 18. Kabirov Yu.V., Gavrilyachenko V.G., Bogatin A.S., Chupakhina T.I., Rusakova E.B., Chebanova E.V. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2605.
 19. Figovskiy O. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №1 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n1y2012/725/.
 20. Alekseev P.S., Dmitriev A.P., Gornyi I.V., Kachorovskii V.Yu., Narozhny B.N., Schütt M., and Titov M. Phys. Rev. Lett. 2015. v. 114. pp. 156601 – 156601 – 6.
 21. Zhang X., Xue Q.Z., Zhu D.D. Phys. Lett. A. 2004. v. 320. pp. 471 – 477.
 22. Mandal G., Srinivas V., Rao V.V. Carbon. 2013. v. 57. pp. 139 – 145.
 23. Lee M., Rosenbaum T.F., Saboungi M.L., Schnyders H.S. Phys. Rev. Lett. 2002. v. 88. pp. 066602 – 066602 – 4.
 24. Xue Q.Z., Zhang X., Zhu D.D. J. Magn. Magn. Mater. 2004. v. 270. pp. 397 – 402.
 25. Xue Q.Z., Zhang X., Zhu D.D. Physica B. 2003. v. 334. pp. 216 – 220.
 26. Xue Q.Z., Zhang X. Phys. Lett. A. 2003. v. 313. pp. 461 – 466.
 27. Makarova T.L. Fizika i tekhnika poluprovodnikov. 2004. v. 38(6). pp. 641 – 664.
 28. Paredes O., Moran O., Fuchs D. and Baca E. Revista Mexicana de Fisica. 2012. v. 58(2). pp. 1 – 3.
-



29. Lin Y.B., Huang Z.G., Yang Y.M., Wang S., Li S.D., Zhang F.M., Du Y.W.
Appl. Phys. A. 2011. v. 104. pp. 143 – 147.