

PACS: 73.61.-r, 62.50.+r

П.И. Поляков, С.С. Кучеренко

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПОЛОЖЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ И ТОЧЕК В ИЗМЕНЕНИЯХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ И СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины  
83114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72  
poljakov@mail.fti.ac.donetsk.ua

*Проведен анализ корреляции электропроводности и ферромагнетизма в поли- и монокристаллических манганитах, выделены критические линии и точки. В изменениях структурного фазового перехода (ФП) и свойств под влиянием  $P$  и  $H$  выявлена роль термо- и магнитоупругой анизотропий. Определено значение упругоанизотропных деформирующих (УАД) напряжений в изменениях структурного ФП и свойств до и после него при смене приоритетов влияния  $H$  и  $T$ .*

### Введение

Разнообразие и переплетение свойств и физических процессов, корреляция электропроводности и магнетизма в манганитах представляют собой интереснейшие явления в физике твердого тела. Им посвящено значительное число работ [1,2] и обзоров [3,4], однако окончательно так и не установлена взаимосвязь магнитных и электрических свойств.

В последние годы наблюдается тенденция изучения резистивности под влиянием не только температур  $T$  и магнитного поля  $H$ , но и высоких гидро- и квазигидростатических давлений  $P$ . Получены значимые результаты, обнаружены новые эффекты и закономерности [5–12]. Обобщающий анализ результатов изменения ФП и свойств резистивности и магнитострикции магнитных полупроводников под влиянием  $T$ – $H$ – $P$ , выявление критических линий, точек и закономерностей их положения в поликристаллическом  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  [8] и монокристаллическом  $\text{LaMnO}_3$  [13] – основная цель данной работы.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

1. В установленном многообразии экспериментальных результатов поликристаллических и пленочных образцов, представленных в работах [10–12], отметим их последовательность. Так, в [10] впервые были обнаружены баро-

и баромагниторезистивный эффекты, проведены оценки соответствия влияния  $T-H-P$  на удельное сопротивление поликристаллических образцов, установлена роль термодинамических УАД-механизмов. В работе [11] впервые выявлены «охлаждающий» и «нагревающий» эффекты влияния давления и магнитного поля и их роль в закономерностях изменений зависимостей  $T_{ms}(P)$ ,  $T_{ms}(H)$ . Найдена закономерность постоянства максимумов магнито-, баро-, и баромагниторезистивного эффектов при одной и той же температуре  $T_{PP}$ , совпадающей с температурой ФП  $T_{ms}$ . По результатам изменений ФП, резистивных и магнитострикционных свойств, представленных в работе [11], установлена знакопеременность влияния  $T-H-P$  на свойства и эффекты в магнитных полупроводниках, определено соответствие зависимости  $H_g(T)$  и  $T_{ms}$ . По данным магнитострикции выявлены критические точки  $P_X$  и  $T_X$ . В [12] показана усовершенствованная методика получения высоких гидростатических давлений и представлены датчики давлений до 25 kbar на основе пленочных образцов магнитных полупроводников.

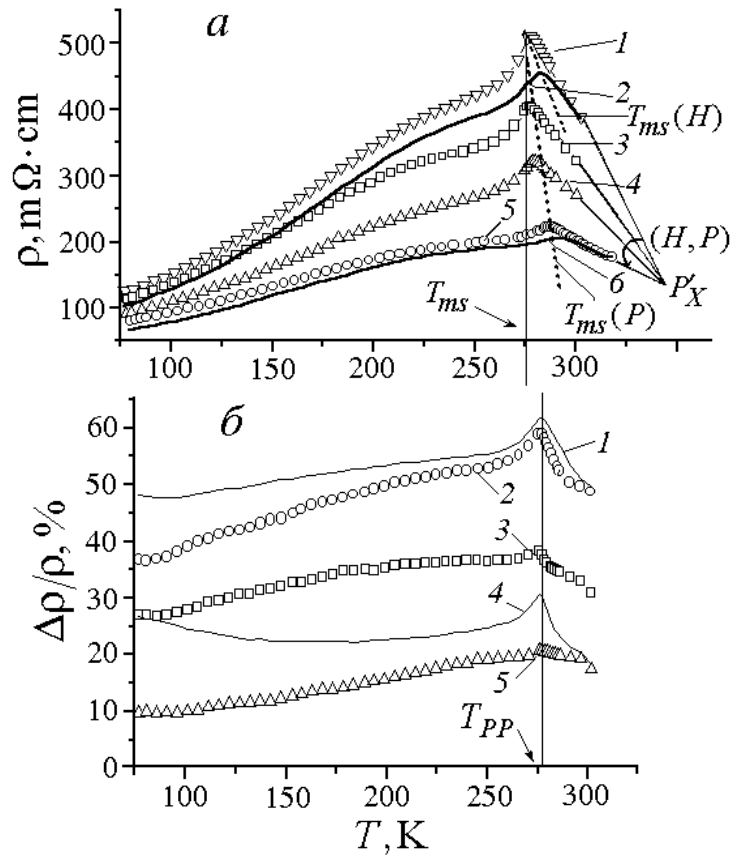
2. В подтверждение универсальности методологии анализа [9–11] параметры оценок влияния  $T-H-P$  на удельное сопротивление в образцах  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ , рассматриваемых в работе [9], составляют 5.1 К–2.42 кОе–1 kbar.

Поскольку в магнитных полупроводниках наблюдаемое линейное смещение зависимостей  $T_{ms}(H)$  и  $T_{ms}(P)$  под влиянием  $T-H-P$  является закономерностью упругих напряжений, оценим соответствие влияния  $T-H-P$  на ФП по удельному сопротивлению поликристаллического образца  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  (рис. 1,а): магнитное поле величиной 2.42 кОе изменяет температуры  $T_{ms}$  на такую же величину, как и приложенное гидростатическое давление в 1 kbar.

В данном образце максимумы баро-, магнито- и баромагниторезистивного эффектов (рис. 1,б), как и в работах [10,11], соответствуют температуре  $T_{PP}$ , совпадающей с температурой ФП  $T_{ms}$ . Из этого следует, что основным фактором, формирующим ФП, являются термоУАД-напряжения, а магнито- и бароУАД-напряжения реализуют «охлаждающий» и «нагревающий» эффекты.

Используя метод аппроксимации, выделим критическую точку  $P'_X$  (рис. 1,а) на пересечении продолжений зависимостей удельного сопротивления от температуры при различных  $H$  и  $P$ . Эти же закономерности можно было бы выявить и в работах [5–7] на температурных зависимостях удельного сопротивления при различных  $H$  и  $P$ , что не противоречит логике эксперимента.

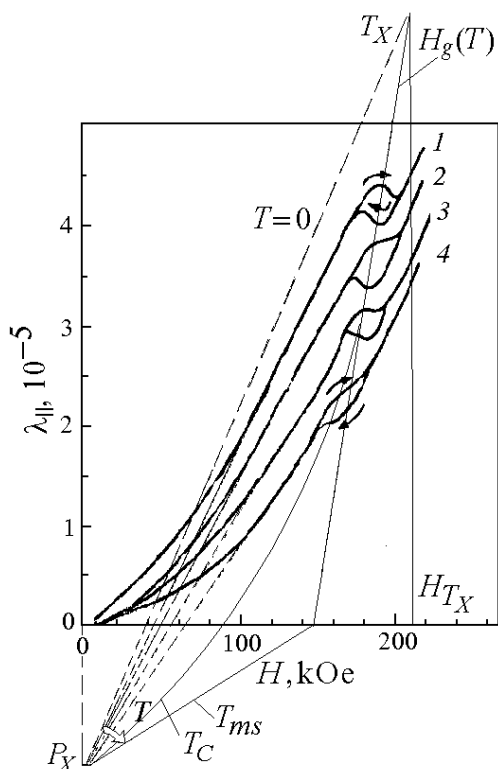
3. Выявлены оценки соответствия влияния  $T$  и  $H$  (5.1 К и ~2.5 кОе) и уточнены положения критических линий и точек в магнитострикционных зависимостях  $\text{LaMnO}_3$  (рис. 2), показанные в работе [11]. Эти оценки позволяют связать изменения  $T_{ms}$  в свойствах температурных зависимостей удельного сопротивления (рис. 1) с изменениями  $H_g(T)$  в магнитострикционных свойствах (рис. 2) и установить соответствие критических линий и точек, показанных на рис. 1, параметрам  $T_{ms}(H)$ ,  $T_{ms}(P)$ ,  $P'_X$ ,  $T_{ms}$ , а на рис. 2 –  $T_C$ ,  $T_{ms}$ ,  $H_{T_X}$ ,  $P_X$ ,  $T_X$ .



**Рис. 1.** Температурная зависимость удельного сопротивления (а) и магнито-, баро-, баромагниторезистивного эффектов (б) поликристаллического образца  $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$  под влиянием магнитного поля и гидростатического давления: а: 1 –  $P = 0, H = 0$ ; 2 –  $P = 0, H = 8$  кОе; 3 –  $P = 6$  кбар,  $H = 0$ ; 4 –  $P = 12$  кбар,  $H = 0$ ; 5 –  $P = 17$  кбар,  $H = 0$ ; 6 –  $P = 17$  кбар,  $H = 8$  кОе; б: 1 –  $P = 17$  кбар,  $H = 8$  кОе; 2 –  $P = 17$  кбар,  $H = 0$ ; 3 –  $P = 12$  кбар,  $H = 0$ ; 4 –  $P = 6$  кбар,  $H = 8$  кОе; 5 –  $P = 6$  кбар,  $H = 0$ ; 6 –  $P = 0, H = 8$  кОе

4. В настоящее время отсутствует последовательный анализ явлений, реализуемых в критических линиях и точках. Аналитические методы изучения изменений параметров и свойств, являющихся признаками критических точек как в физически доступной, так и недоступной областях, являются недостающим звеном в цепи научных изысканий (в то время как экспериментальное обнаружение изменений намагниченности, магнитной восприимчивости, резистивных свойств, в той или иной степени проявляющихся в критических точках с различной степенью точности, отражает простоту классификаций). Анализ признаков и общности приведенных результатов позволяет установить истинную особенность термодинамических процессов в общей задаче изучения механизмов, реализующих физические закономерности непосредственно при исследовании многообразия критических линий и точек (явлений).

5. Обобщим на примере зависимостей изменения удельного сопротивления магнитных полупроводников методы построения критических линий и точек в изменениях ФП и свойств резистивности (рис. 1,а):



**Рис. 2.** Полевая зависимость продольной магнитострикции монокристалла  $\text{LaMnO}_3$  [13]

она связывает динамику изменения свойств со структурой образца;

$T_X$  – критическая точка пересечения построенной зависимости  $H_g(T)$  и изменения магнитострикции при  $T = 0$ ;

$T_C$  – температура Кюри, соответствующая критической точке пересечения кривой  $H_g(T)$  с осью изменений  $H$  на магнитострикционной зависимости. Точка  $T_C$  фиксирует структурный ФП при равенстве термо- и магнитоупругой анизотропий.

Выделенные критические точки  $P_X$ ,  $P'_X$ ,  $T_X$  и линия  $H_g(T)$ , приведенные на рис. 2, обращают внимание на значительные изменения магнитострикции после ФП. Резкий рост наклона зависимостей при повышении температуры и магнитного поля определяет изменения характера намагниченности до и после ФП, что является закономерностью термоУАД-напряжений, а магнитоУАД-напряжения в структуре реализуют «охлаждающий», «нагревающий» эффекты в изменениях ФП и свойств магнитного полупроводника.

6. Анализ выделенных критических линий и точек в исследуемых системах выявляет еще одну важную закономерность – знакопеременность и компенсирующие соответствия механизмов упругих и магнитоупругих свойств и анизотропий в изменениях ФП и свойств под влиянием  $H$  и  $T$ .

Особенности изменения удельного сопротивления (рис. 1,а) связаны с приоритетом термоУАД-напряжений, где упругая анизотропия реализует скачок проводимости в области структурного фазового перехода ме-

$T_{ms}(H)$ ,  $T_{ms}(P)$  – зависимость изменения ФП под влиянием  $H$  и  $P$ ;

$P'_X$  – критическая точка пересечения изменений зависимостей удельного сопротивления от температуры под влиянием  $P$  и  $H$ ;

$T_{ms} = T_{PP}$  – температура реализации ФП совпадает с максимумами зависимостей баро-, магнито-, баромагниторезистивного эффектов (рис. 1).

Следует отметить, что все критические линии и точки являются закономерностью химического состава, связей и симметричных особенностей структуры.

Рассмотрим критические линии и точки в изменениях магнитострикции под влиянием магнитного поля и температуры (рис. 2):

$H_g(T)$  – критическая линия изменений поля гистерезиса;

$P'_X$  – точка пересечения аппроксимированных линейных полевых зависимостей магнитострикции;

талл–полупроводник при температуре  $T_{ms}$  и напряженности магнитного поля  $H = 0$ . Влияние магнитного поля проявляется в свойствах и изменениях зависимости  $T_{ms}(H)$  через «охлаждающий» эффект.

Изменения магнитострикции под воздействием «нагревающего» эффекта магнитного поля (рис. 2) показывают приоритет магнитоУАД-напряжений, а свойства магнитоупругой анизотропии при  $T = 0$  реализуют ФП в критической точке  $T_X$  при  $H_X(T = 0)$ . Последующее влияние конкурирующего механизма термоУАД-напряжений проявляется в изменениях параметра гистерезиса. Это есть закономерность различия термо- и магнитоупругих анизотропий на зависимости  $H_g(T)$  – смещение полей гистерезиса от температуры.

Наиболее важный результат – это знакопеременность приоритетов влияния  $H$  и  $T$  в изменениях структурного ФП и свойств. Из приведенных ранее оценок соответствия изменений  $H$  и  $T$ , отнесенных к параметрам давления, можно установить следующую закономерность. Линейность и нелинейность критических линий зависимостей  $T_{ms}(H)$ ,  $H_g(T)$ , а также изменения параметров гистерезиса объясняются сменой приоритетов конкурирующего влияния  $H$  и  $T$ , а критическая точка  $T_C$  есть следствие положения структурного ФП при равенстве упругой и магнитоупругой анизотропий.

Проведенный анализ устанавливает и логически объясняет роль УАД-напряжений в формировании и изменении ФП и свойств, а также связь этих механизмов через критические линии и точки с особенностями состава и симметрии структуры исследуемых классов веществ. Это позволяет объяснить любые изменения свойств как под влиянием давления, температуры и магнитного поля, так и при варьировании параметрами состава и структуры в многокомпонентных системах через связь критических точек  $T_X$  и  $P_X$ ,  $T_{ms}$ ,  $T_C$  и линий  $T_{ms}(H)$ ,  $H_g(T)$ .

### Заключение

Анализ результатов экспериментальных исследований резистивных свойств в массивном поликристаллическом  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  и свойств магнитострикции в монокристалле  $\text{LaMnO}_3$  позволил установить:

- соответствия влияния  $T$ – $H$ – $P$  на свойства резистивности, и  $T$ – $H$  – на свойства магнитострикции;
- закономерности изменения  $T_{ms}(H)$  и  $H_g(T)$  и роль «охлаждающего», «нагревающего» эффектов;
- знакопеременность в изменении приоритетов влияния  $T$  и  $H$ , проявляющегося в линейной и нелинейной зависимостях критических линий  $T_{ms}(H)$  и  $H_g(T)$  и критической точки  $T_C$  – результата компенсирующего равенства термо-, магнитоупругих анизотропий;
- роль и значение критических точек  $P_X$ ,  $T_X$  и  $P'_X$  и соответствий в изменениях свойств под влиянием температуры и магнитного поля.

Из этого следует, что знакопеременность влияния  $T$  и  $H$  объясняет изменения резистивных свойств, закономерность поведения критической точки  $T_{ms}$  и динамику критической линии  $T_{ms}(H)$  как приоритет термоУАД-напряжений. Изменения же магнитных свойств, динамика критической ли-

нии  $H_g(T)$  и точки  $T_C$  тракуются как смена приоритетов влияния магнитного поля через механизмы магнитоупругих стрикций. Температура  $T_C$  есть закономерность соответствующего равенства термо- и магнитоупругих анизотропий. Параметр  $T_{PP}$  остается постоянной температурой структурного ФП и является основополагающим фактором разделения свойств.

Авторы выражают искреннюю благодарность Н.П. Бойко за интерес, внимание и помощь в работе.

1. G.H. Jonker, J.H. Van Santen, *Physica* **16**, 337 (1950).
2. J.H. Van Santen, G.H. Jonker, *Physica* **16**, 599 (1950).
3. В.М. Локтев, Ю.Г. Погорелов, *ФНТ* **26**, 231 (2000).
4. C.N.R. Rao, B. Raveau, *Colossal Magnetoresistance, Charge Ordering and Related Properties of Manganese Oxides*, World Scientific (1999), p. 345.
5. M.B. Salamon, M. Jaime, *Rev. Mod. Phys.* **73**, 583 (2001).
6. V. Moshnyaga, S. Klimm, E. Gommert, R. Tidecks, S. Horn, K. Samwer, *J. Appl. Phys.* **88**, 5305 (2000).
7. I.V. Medvedeva, K. Bärner, G.H. Rao, N. Hamad, Yu.S. Bersnev, J.R. Sun, *Physica* **B292**, 250 (2000).
8. С.С. Кучеренко, В.И. Михайлов, В.П. Пащенко, П.И. Поляков, В.А. Штаба, В.П. Дьяконов, *Письма в ЖТФ* **27**, вып. 15, 38 (2001).
9. С.С. Кучеренко, В.П. Пащенко, П.И. Поляков, С.И. Харцев, В.А. Штаба, *Письма в ЖТФ* **27**, вып. 11, 24 (2001).
10. P.I. Polyakov, S.S. Kucherenko, *JMMM* **248**, 396 (2002).
11. П.И. Поляков, С.С. Кучеренко, *ФНТ* **28**, 1041 (2002).
12. P.I. Polyakov, V.P. Pashchenko, S.S. Kucherenko, *Defect and Diffusion Forum* **208–209**, 307 (2002).
13. А.М. Кадомцева, Ю.Ф. Попов, Г.П. Воробьева, К.И. Камилев, В.Ю. Иванов, А.А. Мухин, А.М. Балбашов, *ФТТ* **42**, 1077 (2000).

*P.I. Polyakov, S.S. Kucherenko*

#### REGULARITIES IN THE LOCATION OF CRITICAL LINES AND POINTS IN CHANGES OF PHASE TRANSITIONS AND PROPERTIES OF MAGNETIC SEMICONDUCTORS

A correlation of electric conduction and ferromagnetism in poly- and single-crystalline manganites has been analyzed and critical lines and points have been localized. The role of thermo- and magnetoelastic anisotropies in changes of structural phase transition and properties under the influence of  $P$  and  $H$  has been revealed. A significance of elastically anisotropic deforming stresses in changes of  $PT$  and properties before and after the transition with changes in priority of  $H$  and  $T$  effects has been determined.

**Fig. 1.** Temperature dependence of resistivity ( $\rho$ ) and magneto-, baro- baromagneto-resistive effects ( $\delta$ ) for polycrystalline  $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  specimen under the influence of magnetic field and hydrostatic pressure:  $a$ : 1 -  $P = 0$ ,  $\dot{I} = 0$ ; 2 -  $P = 0$ ;  $H = 8$  kOe; 3 -  $P = 6$  kbar,  $H = 0$ ; 4 -  $P = 12$  kbar,  $\dot{I} = 0$ ; 5 -  $D = 17$  kbar,  $\dot{I} = 0$ ; 6 -  $D = 17$  kbar,  $\dot{I} = 8$  kOe;  $\delta$ : 1 -  $P = 17$  kbar,  $\dot{I} = 8$  kOe; 2 -  $P = 17$  kbar,  $\dot{I} = 0$ ; 3 -  $D = 12$  kbar,  $\dot{I} = 0$ ; 4 -  $D = 6$  kbar,  $\dot{I} = 8$  kOe; 5 -  $P = 6$  kbar,  $H = 0$ ; 6 -  $P = 0$ ,  $H = 8$  kOe

**Fig. 2.** Field dependence of longitudinal magnetostriction for  $\text{LaMnO}_3$  single crystal [13]