

Влияние транспортного тока на магнитоэлектрические свойства монокристаллов с гигантским магнитным сопротивлением $\text{La}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$ в СВЧ диапазоне

© Н.В. Волков, Г.А. Петраковский, К.А. Саблина, С.В. Коваль

Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук, 660036 Красноярск, Россия

E-mail: gap@cc.krascience.rssi.ru

(Поступила в Редакцию 13 января 1999 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований по влиянию постоянного тока и переменного тока низкой частоты, а также магнитного поля на проводимость в СВЧ диапазоне σ_{MW} монокристаллов с гигантским магнитосопротивлением $\text{La}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$. Наибольшая чувствительность образцов к токовому воздействию наблюдается в области температур, соответствующих максимуму магнитосопротивления на постоянном токе. Сигнал отклика образца в СВЧ диапазоне на воздействие переменного тока низкой частоты f_0 носит нелинейный характер, что проявляется в генерации гармоник. При изменении f_0 в магнитном поле величина сигнала отклика меняется резонансным образом. Полученные результаты интерпретируются в рамках подхода сосуществования двух фаз, обладающих различной проводимостью, в легированных кристаллах манганитов. В пользу двухфазной интерпретации свидетельствуют данные магниторезонансных исследований, показывающих существование двух магнитных фаз в широком температурном диапазоне в монокристаллах $\text{La}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$.

Повышенный интерес к оксидам марганца со структурой перовскита с общей формулой $R_{1-x}A_x\text{MnO}_3$ (где R — редкоземельные ионы, A — Sr, Ba, Ca, Pb) обусловлен их необычными магнитными и электрическими свойствами. Главным образом это связано с тем, что вещества этого семейства обладают большим изотропным отрицательным магнитосопротивлением, получившим название гигантское (колоссальное) магнитосопротивление (ГМС). Вместе с тем было установлено, что магнитные и электрические свойства манганитов претерпевают существенные изменения при варьировании состава, концентрации, давления, температуры. Есть надежда, что будут получены материалы с приемлемыми параметрами ГМС для применения в практических устройствах магнитной записи информации и других устройствах микроэлектроники. Массированные исследования последних лет всевозможными методами не привели тем не менее к полному пониманию механизмов, объясняющих весь спектр наблюдаемых магнитных и транспортных свойств и их значительную корреляцию.

В качестве одной из возможных моделей, объясняющих эффект ГМС в замещенных манганитах, в настоящее время обсуждается механизм электронного разделения фаз [1–3]. Образец в случае такого разделения в условиях термодинамического равновесия состоит из областей, отличающихся концентрацией носителей, в кристаллографическом отношении образец является однородным. Состояние такой двухфазной системы сильно чувствительно к воздействию внешних факторов, таких как температура, внешнее магнитное поле, давление. Повидимому, следует ожидать, что такая система будет чувствительна и к воздействиям постоянного и особенно переменных токов различной частоты и амплитуды (имеются в виду не малые измерительные токи) как без поля, так и во внешнем магнитном поле. Эффект,

связанный с воздействием импульса тока на поведение системы в разделении фаз, наблюдался в вырожденном полупроводнике EuTe [4], двухфазное АФМ–ФМ состояние которого считается доказанным. Что касается исследования манганитов, большинство данных, приводимых в литературе, относится к измерению сопротивления и магнитосопротивления на постоянном токе (при малых измерительных токах), но практически нет данных по исследованию магниторезистивного эффекта на переменном токе в различных частотных диапазонах. Следует отметить ряд публикаций, посвященных исследованию магниторезистивного эффекта на микроволновых частотах [5–7]. Характерным для указанных исследований является наличие существенных различий в температурных и магнитополевых зависимостях сопротивлений образцов, измеренных на постоянном токе и в СВЧ диапазоне.

В настоящей работе мы предлагаем результаты исследований по влиянию постоянного и переменного токов на магнитные и электрические свойства монокристаллов манганитов, обладающих ГМС. Изменение состояния исследуемых материалов регистрировалось по изменению их потерь в СВЧ диапазоне длин волн.

1. Экспериментальная часть

Исследования проводились на монокристаллах $\text{La}_{1-x}\text{Pb}_x\text{MnO}_3$, выращенных методом спонтанной кристаллизации из раствора-расплава. Особенность технологии заключалась в том, что PbO и PbF_2 использовались в качестве растворителя и в то же время обеспечивали содержание примеси Pb в кристаллах. Состав шихты из La_2O_3 , MnO_2 и растворителя готовился таким образом, чтобы обеспечить концентрацию Pb $x \sim 0.3$. Кристаллы

выращивались в платиновом тигле. Выбранный технологический режим обеспечивал получение кристаллов со средним размером $5 \times 5 \times 5 \text{ mm}^3$. Рентгеновский анализ полученных монокристаллов подтвердил структуру и параметры решетки, соответствующие $x \sim 0.3$.

Образцы для исследований изготовлялись в форме пластинок размерами $4 \times 2 \times 0.1 \text{ mm}^3$, поверхности пластинок полировались. Для измерения проводимости в диапазоне СВЧ σ_{MW} использовался спектрометр магнитного резонанса [8] с рабочей частотой 10.6 GHz. Образец размещался внутри прямоугольного объемного резонатора в максимуме электрической составляющей электромагнитного СВЧ поля. Для пропускания тока через образец использовались прижимные контакты в виде тонких иголок.

В ходе экспериментов измерялась мощность, отраженная от резонатора с образцом P_c , или ее изменение как функции температуры, внешнего магнитного поля, величины прикладываемого к образцу напряжения и его частоты при постоянной входной мощности СВЧ P_{in} .

Заметим, что обычно используется методика измерения проводимости на СВЧ σ_{MW} , когда образец, обладающий высокой проводимостью, помещался в максимум магнитной составляющей электромагнитного СВЧ поля. В этом случае нетрудно получить зависимость, которая прямо связывает величину σ_{MW} с мощностью, отраженной от резонатора P_c . Однако если образец ферромагнитный, ситуация значительно усложняется, так как в этом случае необходимо учитывать вклад в СВЧ поглощение от динамической магнитной проницаемости μ , которая зависит от частоты электромагнитного излучения, внешнего магнитного поля, намагниченности образца.

В случае, когда размеры образца много меньше длины волны электромагнитного излучения и толщина скин-слоя δ больше или порядка минимального размера образца, можно воспользоваться методикой измерения σ_{MW} , помещая образец в максимум электрической составляющей СВЧ поля в резонаторе [9]. Используя метод возмущений, можно получить для комплексной диэлектрической проницаемости образца $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ связь с параметрами резонатора. Для проводящих материалов $\varepsilon'' = \sigma_{MW}/\omega$ и, как правило, $\varepsilon'' \gg \varepsilon'$. При отсутствии деполаризующих факторов

$$\begin{aligned} \frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0} &\approx (\varepsilon'' E_m^2 \Delta V) \left(\varepsilon_0 \int_{V_0} E_0^2 dV \right)^{-1} \\ &= (\sigma_{MW} E_m^2 \Delta V) \left(\varepsilon_0 \omega \int_{V_0} E_0^2 dV \right)^{-1}, \end{aligned}$$

здесь Q_0 — добротность резонатора без образца, Q — с образцом, ΔV — объем образца, V_0 — объем резонатора, E_m — величина электрического поля в пучности, E_0 — невозмущенное электрическое поле в резонаторе, ε_0 — диэлектрическая проницаемость среды резонатора. Таким образом, проводимость σ_{MW} связана с добротностью нагруженного резонатора, и если измерение абсолютной величины σ_{MW} вызывает определенные

трудности, то о ее изменении при воздействии внешних факторов можно просто судить по изменению СВЧ мощности, отраженной от резонатора ΔP_c .

Использование подобной методики измерения σ_{MW} было обосновано в нашем случае, поскольку во всем температурном диапазоне величина скин-эффекта образцов составляла $\delta > 0.6 \text{ mm}$, и практически исключался вклад от μ в поглощаемую образцом СВЧ мощность.

Измерения проводились в сравнительно небольших магнитных полях до $H = 7 \text{ kOe}$. Направление H совпадало с направлением тока в образце. Сопротивление материалов по постоянному току и по переменному току на низких частотах измерялось традиционным четырехконтактным методом. В диапазоне температур 100–360 K измерения проводились в проточном азотном криостате.

2. Результаты и обсуждение

Как отмечалось выше, изменение параметров СВЧ отклика (мощности, отраженной от резонатора P_c) несет информацию об изменении проводимости материала σ_{MW} . Поэтому в качестве главного параметра, за которым мы следили, была взята величина относительного изменения P_c .

На рис. 1, *a* представлена зависимость мощности, отраженной от резонатора P_c от величины постоянного напряжения U_- , прикладываемого к образцу, в нулевом магнитном поле и в поле $H = 7 \text{ kOe}$. Обращает на себя внимание крайне нелинейная зависимость $P_c(U_-)$, значительная несимметричность зависимости относительно $U_- = 0$ и увеличение относительного влияния внешнего магнитного поля при увеличении напряжения U_- . Такую зависимость нельзя объяснить простым нагревом образца. Во-первых, вольтамперная характеристика на постоянном токе при тех же величинах U_- практически линейна, рис. 1, *b*. Во-вторых, мы непосредственно контролировали температуру образца, максимальный нагрев не превышал 1 K при длительном воздействии тока. Наконец, при воздействии переменного тока в случае нагрева все свелось бы к изменению P_c на постоянную величину.

Мы провели эксперименты по измерению параметров СВЧ отклика ΔP_c при воздействии на образец переменного напряжения низкой частоты от 20 Hz до 10 kHz. Эти результаты и оказались наиболее интересными и информативными. Сигнал СВЧ отклика при возбуждении образца переменным током частоты f_0 представлял собой набор четных и нечетных гармонических составляющих

$$\Delta P_c(t) = \sum_n A_n \cos(n f_0 t).$$

При этом наибольшую амплитуду имела составляющая на частоте $2f_0$, и вообще четные гармоники были

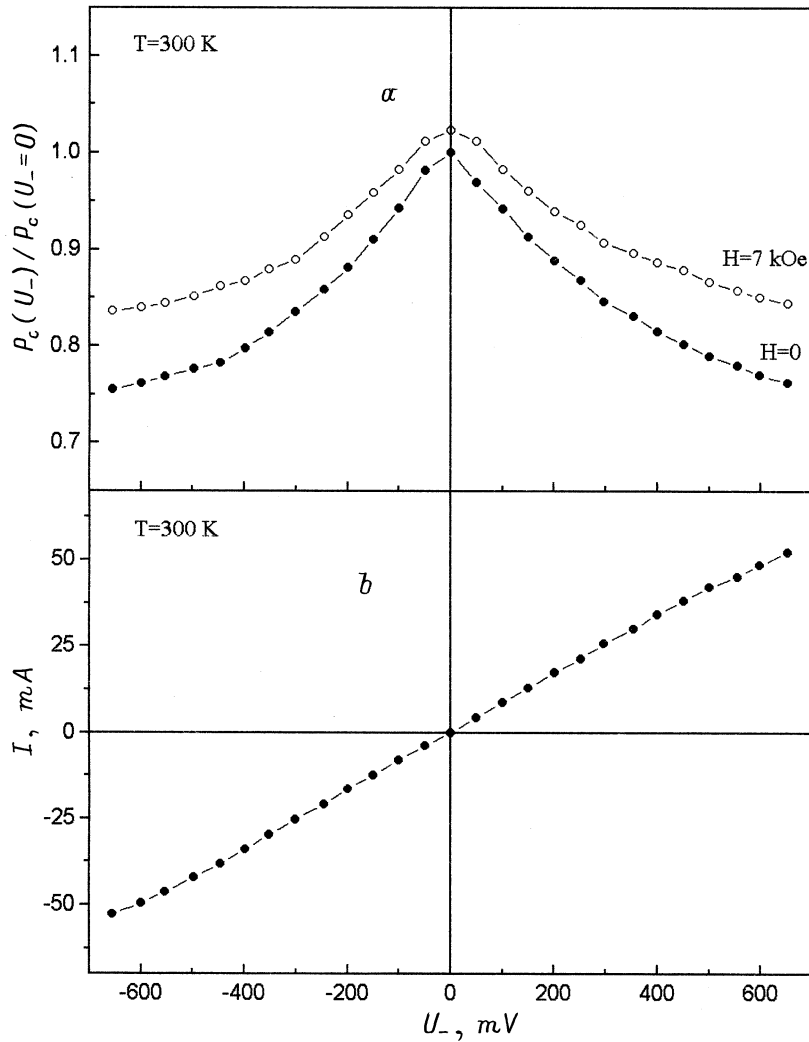


Рис. 1. *a* — зависимость мощности, отраженной от резонатора P_c , от величины напряжения U_- постоянного тока, пропускаемого через образец монокристалла $\text{La}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$. Величина мощности нормирована на величину $P_c(U_- = 0, H = 0)$. $T = 300$ К. *b* — вольтамперная характеристика образца. $T = 300$ К.

более интенсивны, чем нечетные. Амплитуды каждой гармонической составляющей в сигнале СВЧ отклика и соотношение между амплитудами гармоник зависели от величины U_{\sim} прикладываемого к образцу напряжения. На рис. 2 приведены зависимости амплитуды четных и нечетных гармоник СВЧ отклика от U_{\sim} для частоты $f_0 = 1$ kHz. Показаны гармоники с f_0 по $6f_0$, хотя наша аппаратура позволяла наблюдать составляющую в сигнале ΔP_c с частотой $12f_0$. При измерениях четырехконтактным методом на частоте $f_0 = 1$ kHz не было обнаружено никаких нелинейных проявлений, вольтамперная характеристика, как и на постоянном токе, практически линейна. Линейная вольтамперная характеристика и проведенные нами специальные дополнительные эксперименты с изменением формы и материала электрических контактов позволяют исключить из рассмотрения предположение, что наблюдаемые эффекты связаны с контактными явлениями.

Далее для простоты мы остановимся на поведении первой и второй гармоник сигнала СВЧ отклика. На рис. 3 показано влияние внешнего магнитного поля на поведение амплитуды первой (A_1) и второй (A_2) гармоник в зависимости от U_{\sim} при температуре $T = 300$ К. Амплитуда A_1 наиболее сильно зависит от величины внешнего магнитного поля H , при этом A_1 увеличивается при увеличении H , а амплитуда второй гармоники A_2 незначительно уменьшается. На рис. 4, *a, b* приведены температурные зависимости A_1 и A_2 при $H = 0$ и $H = 7$ kOe, во всем температурном диапазоне на образце поддерживалась постоянная величина переменного напряжения $U_{\sim} = 500$ mV частотой $f_0 = 1$ kHz. Для сравнения на рис. 4, *c* приведено температурное поведение удельного сопротивления ρ и магнитосопротивления $\Delta\rho/\rho_0 = (\rho(0) - \rho(H)/\rho(0))$ 100% образца в поле $H = 7$ kOe, полученное при измерении четырехконтактным методом на постоянном токе.

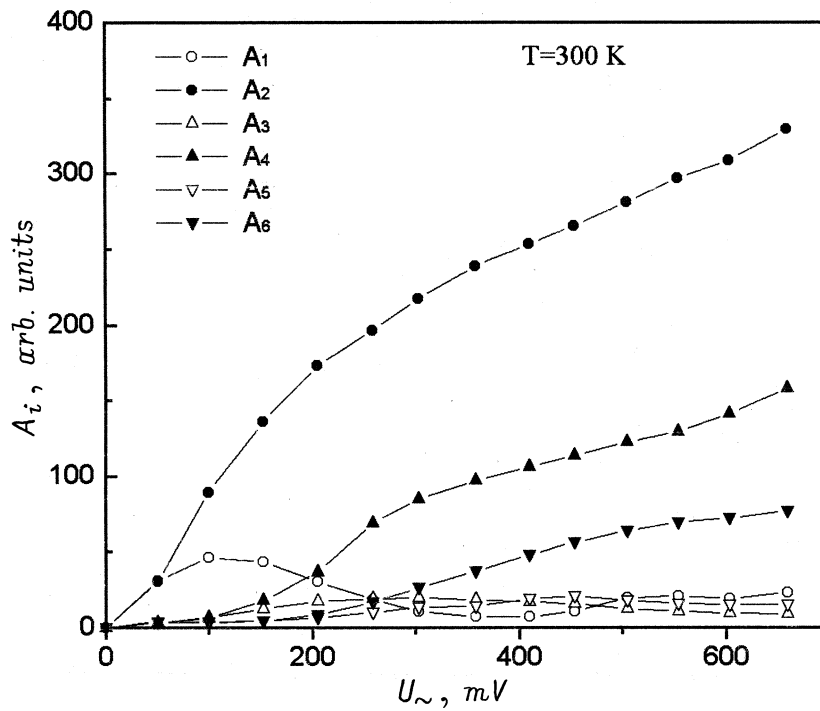


Рис. 2. Зависимости амплитуды нечетных A_1, A_3, A_5 и четных A_2, A_4, A_6 гармоник сигнала СВЧ отклика от величины переменного напряжения U_{\sim} частоты $f_0 = 1$ kHz, прикладываемого к образцу. $T = 300$ К.

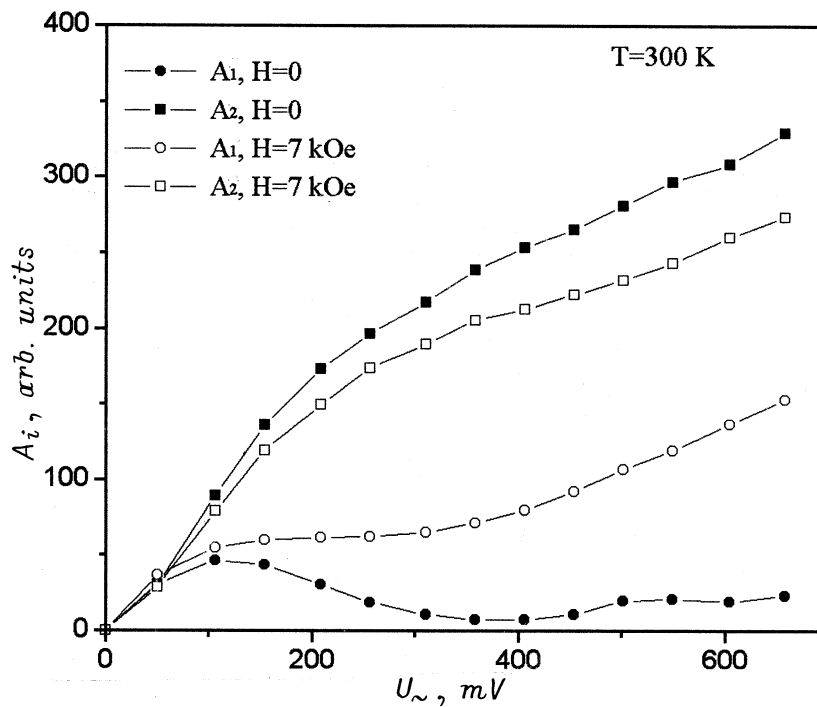


Рис. 3. Зависимости амплитуды первой A_1 и второй A_2 гармоник сигнала СВЧ отклика от величины переменного напряжения U_{\sim} ($f_0 = 1$ kHz), прикладываемого к образцу, в магнитном поле $H = 0$ и $H = 7$ kOe. $T = 300$ К.

Температурная зависимость амплитуды второй гармоники сигнала СВЧ отклика A_2 качественно повторяет поведение магнитосопротивления на постоянном токе, максимум A_2 и наиболее сильное влияние магнитного поля H наблюдается при температуре $T \sim 325$ К, этой

же температуре соответствует максимум $\Delta\rho/\rho_0$. В интервале температур 250–330 К наблюдается уменьшение A_2 во внешнем магнитном поле. При $T < 250$ К и $T > 330$ A_2 незначительно растет при увеличении H .

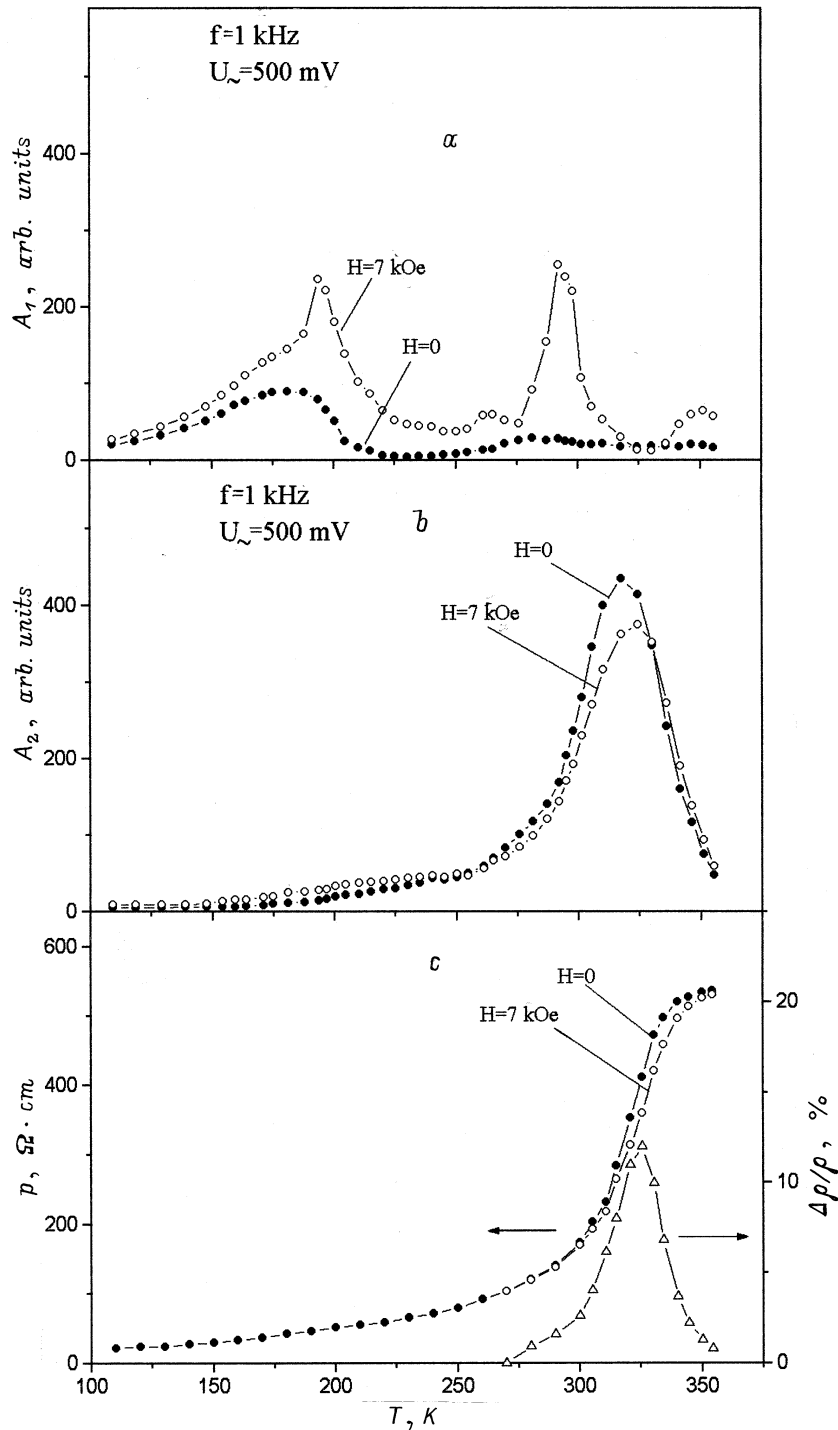


Рис. 4. Температурные зависимости амплитуды первой A_1 (a) и второй A_2 (b) гармоник сигнала СВЧ отклика при величине переменного напряжения на образце $U_{\sim} = 500$ mV (частота $f_0 = 1$ kHz) в магнитном поле $H = 0$ и 7 kOe. Температурные сопротивления ρ и магнитосопротивления $\Delta\rho/\rho_0$ в поле $H = 7$ kOe, снятые на постоянном токе (c).

Необычное температурное поведение амплитуды первой гармоники СВЧ сигнала A_1 стало более понятным после того, как мы сняли зависимости A_1 и A_2 от частоты модулирующего напряжения на образце f_0 для различных температур (рис. 5). Вообще амплитуда

сигнала СВЧ отклика при фиксированной температуре мало изменялась для частот переменного напряжения на образце до 5 kHz, при дальнейшем увеличении f_0 амплитуда сигнала быстро уменьшалась, и выше 10 kHz сигнал СВЧ отклика не наблюдался.

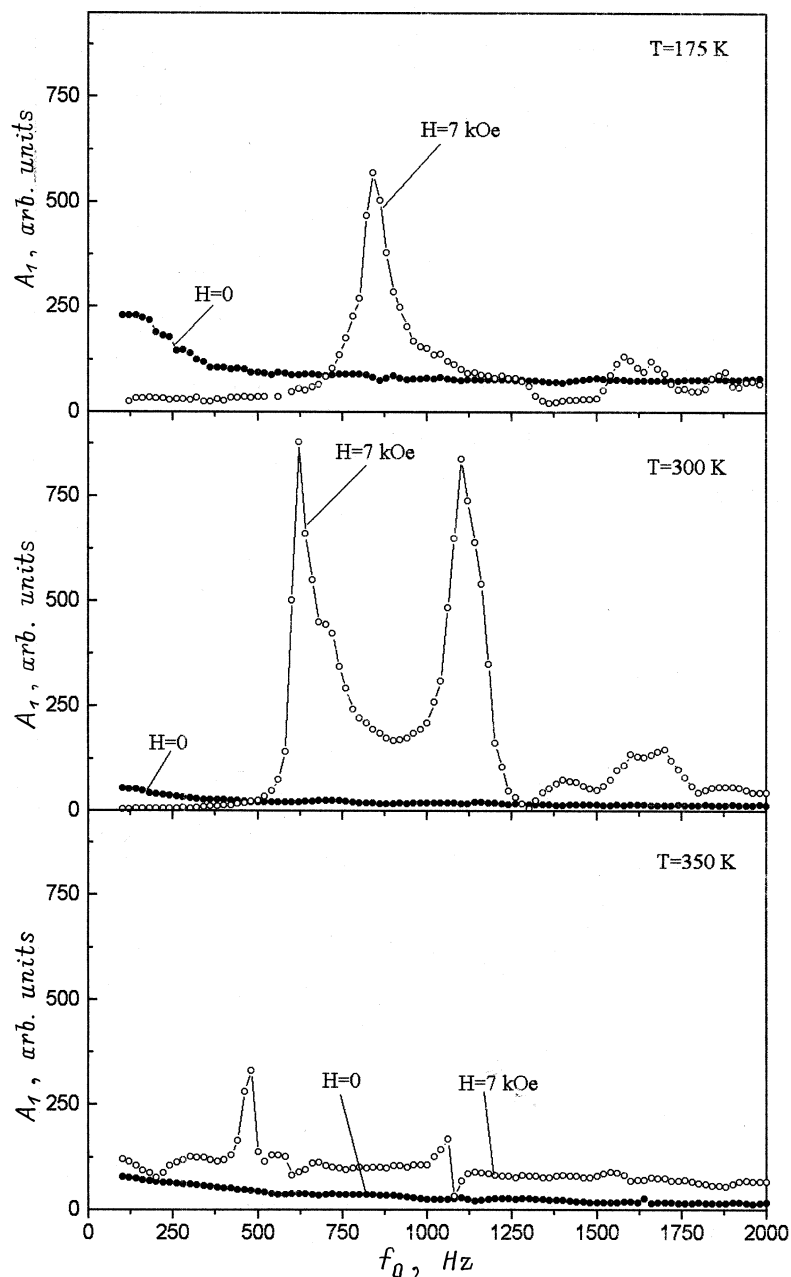


Рис. 5. Зависимости амплитуды первой A_1 гармоники сигнала СВЧ отклика от частоты f_0 переменного напряжения на образце ($U_{\sim} = 500$ мВ) в магнитном поле $H = 0$ и 7 кОе. *a* — $T = 350$ К, *b* — $T = 300$ К, *c* — $T = 175$ К.

Величина амплитуды первой гармоники A_1 при $H = 0$ слабо зависит от частоты f_0 и является гладкой кривой для всех температур. Во внешнем магнитном поле происходит резонансное увеличение A_1 на определенных частотах (в диапазоне от 200 Гц до 2 кГц, см. рис. 5). Высота пиков на зависимости A_1 от частоты f_0 увеличивается при увеличении поля H без сдвига по частоте. Особенности в виде двух пиков в спектре A_1 ($H = 7$ кОе) начинают проявляться при температуре $T = 355$ К (рис. 5, *c*). При понижении температуры их высота увеличивается, и они незначительно сдвигаются по частоте (рис. 5, *b*). Ниже $T \sim 300$ К пики трансформируются

в один (рис. 5, *a*), высота которого при дальнейшем понижении температуры уменьшается. При $T \sim 100$ К особенности на зависимости $A_1(f_0, H = 7$ кОе) исчезают, и она совпадает с кривой $A_1(f_0, H = 0)$. Максимальная чувствительность A_1 к внешнему магнитному полю наблюдается при $T \sim 325$ К, что соответствует максимуму магниторезистивного эффекта на постоянном токе.

Наблюдение за A_2 в диапазоне частот от 20 Гц до 2 кГц не выявило никаких особенностей. Увеличение внешнего магнитного поля изменяло A_2 на одинаковую величину во всем рассматриваемом частотном диапазоне.

Как показано выше, изменение сигнала СВЧ отклика ΔP_c связано с изменением величины проводимости σ_{MW} в СВЧ диапазоне. Наши данные свидетельствуют, что при пропускании постоянного тока через образец монокристалла $\text{La}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$ происходит уменьшение его проводимости в СВЧ диапазоне σ_{MW} . Внешнее магнитное поле H , как и следовало ожидать, увеличивает величину σ_{MW} , причем относительное влияние H усиливается при увеличении постоянного напряжения на образце U_- . Изменение σ_{MW} при пропускании тока не зависит от его направления в кристалле. Действие внешнего магнитного поля H является изотропным, т. е. нет зависимости от взаимной ориентации направления транспортного тока и H .

Резкое отличие поведения σ_{MW} и проводимости, измеренной на постоянном токе σ_{DC} , с нашей точки зрения, можно понять, используя представление о двухфазном состоянии образца [1]. В этом случае монокристалл манганита представляет собой термодинамически-равновесную систему сосуществующих областей с различной концентрацией носителей. Одна из фаз соответствует областям с высокой проводимостью и соответственно ферромагнитным (ФМ) упорядочением, другая — областям с более низкой проводимостью, находящимся в другом магнитном состоянии, например, парамагнитном (ПМ). Условно будем называть эти фазы соответственно "металлической" и "диэлектрической".

Для объяснения поведения проводимости образца в двухфазном состоянии будем исходить из классической перколяционной модели (см., например, [10]), в которой отсутствуют конкретные механизмы проводимости каждой из фаз, и все определяется соотношением концентраций областей с разной проводимостью и их топологией. При низких температурах образец представляет собой односвязную "металлическую" ФМ фазу, внутри которой могут существовать несвязанные между собой области "диэлектрической" фазы. При увеличении температуры области "диэлектрической" фазы растут, объем "металлической" фазы уменьшается. Соотношение между объемами фаз при постоянной концентрации легирования помимо температуры будет определяться внешним магнитным полем (магнитное поле увеличивает объем ФМ фазы), и по-видимому, как следует из наших экспериментов, величиной транспортного тока, пропускаемого через образец.

При измерении в СВЧ диапазоне проводимость σ_{MW} проявляет себя как эффективная усредненная величина от проводимостей "металлической" и "диэлектрической" фаз. Действительно, хорошо известно, что если вещество представляет собой неоднородную смесь и длина волны электромагнитного излучения намного больше масштабов неоднородностей, то такая смесь может рассматриваться как однородная и изотропная среда. Но характеризоваться она будет определенным эффективным значением ε , а следовательно, и σ_{MW} [11]. Причем эффективное значение ε неоднородной среды представляется возможным вычислить точно в общем виде только для некоторых предельных случаев.

При измерении же на постоянном токе, когда есть протекание по "металлической" фазе, проводимость σ_{DC} будет определяться в основном проводимостью этой фазы. Поэтому небольшие изменения в соотношении концентраций фаз не скажутся заметно на измеряемой величине σ_{DC} . Чтобы получить заметное изменение σ_{DC} , нужно приложить большее магнитное поле. То же касается и транспортного тока, влияние которого на σ_{DC} должно заметно сказываться при больших величинах прикладываемого к образцу напряжения, но в этом случае будет происходить значительный разогрев образца, и корректная постановка эксперимента не представляется возможной.

При увеличении температуры ФМ порядок будет подавляться, а концентрация "диэлектрической" фазы увеличиваться. Выше некоторой температуры T_0 количество "металлической" фазы уменьшается настолько, что из односвязной области она превращается в многосвязную, и протекание тока по ней через весь образец прекращается. Поэтому проводимость будет главным образом определяться "диэлектрической" фазой. Понятно, что наиболее сильные изменения проводимости и наиболее сильная чувствительность к магнитному полю и транспортному току в рамках перколяционной модели должны проявляться в области температуры T_0 , которую можно рассматривать как температуру порога протекания по "металлической" фазе. В нашем случае $T_0 \sim 325$ К, именно при этой температуре достигается максимум $\Delta\rho/\rho_0$.

В качестве дополнительного аргумента в пользу концепции сосуществования двух фаз в исследуемых нами манганитах приведем результаты магниторезонансных исследований монокристаллов $\text{Ln}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$. При $T > T_c \sim 355$ К наблюдается линия магниторезонансного поглощения, соответствующая ПМ состоянию кристалла. Ниже температуры T_c наблюдалось две линии магнитного резонанса вплоть до температуры ~ 100 К. Линия, соответствующая ПМ состоянию, при понижении температуры сильно уширялась, резонансное поле H_r оставалось неизменным, а ее интенсивность практически монотонно уменьшалась за исключением области температур 315–340 К (рис. 6). Интенсивность линии поглощения, соответствующей ферромагнитному состоянию (ФМ), увеличивалась при понижении температуры, H_r наиболее сильно уменьшалось при T от 355 до 290 К, а затем выходила на плато. Обращают на себя внимание особенности в поведении интенсивностей линий ФМ и ПМ резонансов в области температуры $T_0 \sim 325$ К, соответствующей максимальному магниторезистивному эффекту. Это можно объяснить тем, что при этих температурах внешнее магнитное поле H наиболее эффективно увеличивает концентрацию ФМ фазы в образце.

Нелинейный вид зависимости мощности, отраженной от резонатора P_c , от величины U_- на образце (рис. 1) позволяет предположить проявление этой нелинейности в сигнале СВЧ отклика при воздействии на образец переменного напряжения U_{\sim} низкой частоты f_0 , например

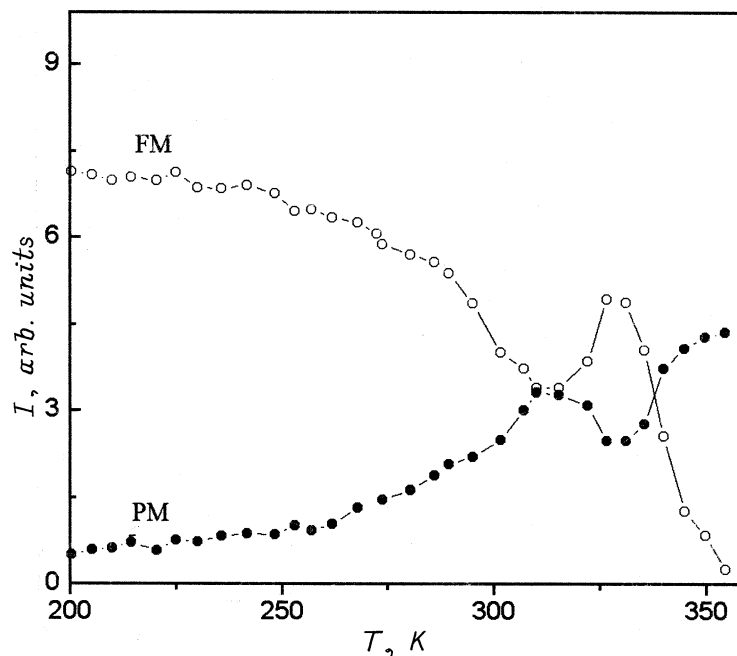


Рис. 6. Температурное поведение интенсивностей линий магнитного резонанса ($\nu = 10.6$ GHz), соответствующих ПМ и ФМ фазам в монокристалле $\text{La}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$.

в виде появления в сигнале отклика высших гармонических составляющих. Практически полная симметричность характеристики позволяет ожидать, что основной сигнал СВЧ отклика будет наблюдаться на удвоенной частоте модулирующего напряжения $2f_0$ и возможно присутствие четных гармоник сигнала отклика. Это подтверждается нашими экспериментами.

Согласно рис. 1, внешнее магнитное поле H должно уменьшать амплитуду СВЧ отклика, что мы и наблюдали на примере A_2 (рис. 3). Качественно подобный вид температурных зависимостей A_2 и $\Delta\rho/\rho_0$ подтверждает непосредственную связь механизмов, ответственных за влияние на электрические свойства монокристаллов манганитов внешнего магнитного поля и транспортного тока, что находит разумное объяснение в рамках теории двухфазного состояния образца.

Пока неясно, с чем связано появление в сигнале СВЧ отклика составляющей на частоте f_0 , нечетных гармоник и особенно увеличение резонансным образом A_1 во внешнем магнитном поле при изменении частоты f_0 модулирующего напряжения на образце. Вероятнее всего, такое поведение можно связать, оставаясь в рамках двухфазного подхода, с динамикой смещения границ областей "металлической" и "диэлектрической" фаз или подвижностью областей в целом. При совпадении частоты модулирующего напряжения на образце f_0 с собственными частотами колебаний границ наблюдается резонансное увеличение амплитуды A_1 , внешнее магнитное поле можно рассматривать как величину, эффективно влияющую на параметры диссипации ω_d рассматриваемой системы, а следовательно, и на интенсивность резонансных линий в спектре. Основной причиной, вызывающей размытость

спектра резонанса границ, является сложная геометрия двухфазного состояния, распределение областей, относящихся к разным фазам, по размеру и форме. С изменением температуры происходит существенная перестройка двухфазного состояния системы, что и отражается на спектрах, снятых при разных температурах.

Мы сознательно приводим лишь качественные рассуждения, поскольку остается целый ряд вопросов, не позволяющих проводить корректные количественные оценки. Прежде всего, не ясен механизм разделения фаз в изучаемых нами материалах. Например, возможна реализация механизма примесного разделения фаз, связанного с неоднородным распределением примеси в кристалле. Хотя в этом случае, по сравнению с механизмом электронного разделения фаз, трудно ожидать сильной чувствительности к воздействию внешних факторов, таких как внешнее магнитное поле и транспортный ток. Остается открытым вопрос о механизме обнаруженного нами воздействия транспортного тока на проводимость σ_{MW} монокристаллов $\text{La}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$. Неизвестна топология двухфазного состояния, которая коренным образом меняется с изменением температуры. Необходимо учитывать и конкретные механизмы проводимости в каждой из фаз.

Таким образом, в настоящей работе мы представили результаты экспериментов по влиянию простоянного и переменного токов на проводимость монокристаллов $\text{La}_{0.7}\text{Pb}_{0.3}\text{MnO}_3$ в СВЧ диапазоне σ_{MW} . Исследования показывают, что транспортный ток приводит к уменьшению σ_{MW} , внешнее магнитное поле, как и следовало ожидать, напротив увеличивает величину проводимости. Наибольшее влияние тока приходится на температуру,

где наблюдается максимум магниторезистивного эффекта, снятого на постоянном токе. При воздействии переменного тока кристаллы проявляют нелинейные свойства, выражающиеся в генерации гармоник в сигнале СВЧ отклика от резонатора с образцом. Обнаружена зависимость СВЧ отклика от частоты переменного тока на образце во внешнем магнитном поле, причем изменение носит резонансный характер.

Полученные результаты непротиворечиво описываются в рамках теории фазового разделения в кристаллах легированных манганитов с использованием классического перколяционного подхода. В пользу разделения фаз говорят также магниторезонансные исследования, прямо показывающие сосуществование ФМ и ПМ фаз в образцах в широком температурном диапазоне.

Список литературы

- [1] Э.Л. Нагаев. УФН **166**, 8, 833 (1996).
- [2] Э.Л. Нагаев. УФН **168**, 8, 917 (1998).
- [3] Л.Г. Горьков. УФН **168**, 6, 664 (1998).
- [4] В.В. Осипов, И.В. Кочев. ФТТ **33**, 3, 942 (1991).
- [5] M. Dominguez, S.M. Bhagat, S.E. Lofland, J.S. Ramachaudran, G.C. Xiong, H.L. Ju, T. Venkatesan, R.L. Greene. Europhys. Lett. **32**, 4, 349 (1995).
- [6] S.E. Lofland, S.M. Bhagat, S.D. Tyagi, Y.M. Mukovskii, S.G. Karabashev, A.M. Balbashov. J. of Appl. Phys. **80**, 6, 3592 (1997).
- [7] Н.И. Солин, А.А. Самохвалов, С.В. Наумов. ФТТ **40**, 10, 1881 (1998).
- [8] Н.В. Волков, Г.С. Патрин. Препринт № 635 ФИФ СОАН СССР, Красноярск (1990). 18 с.
- [9] Л.И. Буравов, И.Ф. Щеголев. ПТЭ 2, 171 (1972).
- [10] Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. Электронные свойства легированных полупроводников. Наука, М. (1979).
- [11] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. Наука, М. (1982). 620 с.