

Косвенное спин-спиновое взаимодействие ядер в оксидах $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$

Оглобличев В.В., Пискунов Ю.В., Бузлуков А.Л., Верховский С.В., Погудин А.В.



Из экспериментов по измерению сигнала спинового эха ^{207}Pb и сигнала двойного $^{170}\text{-}^{207}\text{Pb}$ резонанса спинового эха в оксидах $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$ (BPBO) определены константы косвенных гомоядерного (^{207}Pb - ^{207}Pb) и гетероядерного ($^{170}\text{-}^{207}\text{Pb}$) взаимодействий ядерных спинов через электронную систему зоны проводимости. Получены убедительные свидетельства в пользу развития микроскопически неоднородного состояния электронной системы в сверхпроводящих оксидах $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$.

Оксиды $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$ со структурой перовскита имеют при $x=0.25$ температуру перехода в сверхпроводящее состояние $T_{c,\text{max}}=13\text{K}$. Особенностью их фазовой диаграммы является близость области сверхпроводящих составов к концентрационному переходу сверхпроводящий металл – полупроводник. Структурные неоднородности, особенно ярко проявляющиеся в области существования сверхпроводящих составов BPBO, приводят к неустойчивости однородного по кристаллу состояния электронной системы. В частности, к пространственному неоднородному распределению спиновой плотности носителей заряда. В настоящее время широко исследуется и обсуждается взаимосвязь сверхпроводимости и микроскопического неоднородного состояния электронной системы в перовскитоподобных оксидах. Необходима дополнительная информация о причинах формирования и развития в сверхпроводниках этих неоднородных состояний.

Уникальную информацию об особенностях пространственной дисперсии спиновой восприимчивости $\chi_s(q)$ и сверхтонких электрон-ядерных связях можно получить, исследуя косвенные спин-спиновые взаимодействия (КССВ) между ядерными спинами. Подобные сведения являются ключевыми при обсуждении неоднородного состояния электронной спиновой системы с существенными кулоновскими корреляциями. В подавляющем большинстве случаев твердого

тела не представляется возможным измерить константу КССВ – $^{15}J_{\text{ind}}$ по характерному расщеплению линии неоднородно уширенного спектра ЯМР. В данной работе представлены результаты прямых измерений констант КССВ соседних атомов Pb-Pb ($^{207}J_{\text{ind}}$) и O-Pb ($^{170}\text{-}^{207}J_{\text{ind}}$) в оксидах $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$. На *рис.1* представлены данные по затуханию амплитуды спинового эха ядер свинца $^{207}E(2\tau)$, которое носит осциллирующий характер. Большая величина сверхтонкого поля $^{207}H_{\text{hf}}$ приводит к тому, что спин-спиновое взаимодействие ядер тяжелых атомов свинца ($Z=82$) определяется, в основном, косвенным взаимодействием через электроны проводимости, которое существенно превышает по интенсивности дипольное взаимодействие магнитных моментов ядер свинца. Осциллирующий вклад в $^{207}E(2\tau)$ обусловлен множителем $\cos(^{207}J_{\text{ind}}\tau)$ [1] с константой $^{207}J_{\text{ind}}=11.9\text{кГц}$, которая соответствует паре спинов – ближайших соседей ^{207}Pb – ^{207}Pb , связанных между собой косвенным взаимодействием. Соответственно величина отношения $|^{207}J_{\text{ind}}/\langle\Delta\nu\rangle|\approx 0.07$, где $\langle\Delta\nu\rangle$ – средний сдвиг линии ЯМР ^{207}Pb , является оценкой снизу характерных микронеоднородностей основного состояния электронной системы $|\Delta\chi_{s,\text{loc}}/\chi_s(q=0)|\approx 0.07$ в оксидах $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$. Наблюдение эволюции ядерной намагниченности спинов ^{17}O под действием статической части гетероядерных взаимодействий ^{17}O – ^{207}Pb было выполнено в ходе экспериментов по двойному ^{17}O – ^{207}Pb резонансу спинового эха в об-

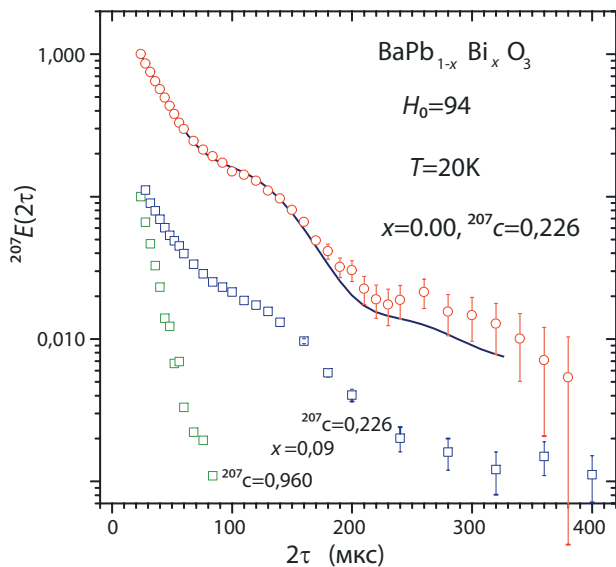


Рис.1.

Затухание амплитуды спинового эха ядер свинца $^{207}E(2\tau)$ в оксидах $BaPb_{1-x}Bi_xO_3$:
 ○ – $x=0,00; ^{207}c=0,226$; □ – $x=0,09; ^{207}c=0,226$; □ – $x=0,09; ^{207}c=0,960$.
 Сплошная кривая – результат аппроксимации данных $^{207}E(2\tau)$ для $x=0,00$ выражением вида $E(2\tau) \propto \exp(-2\tau/T_2) \cdot \cos(\omega_{\text{оч}} 2\tau)$

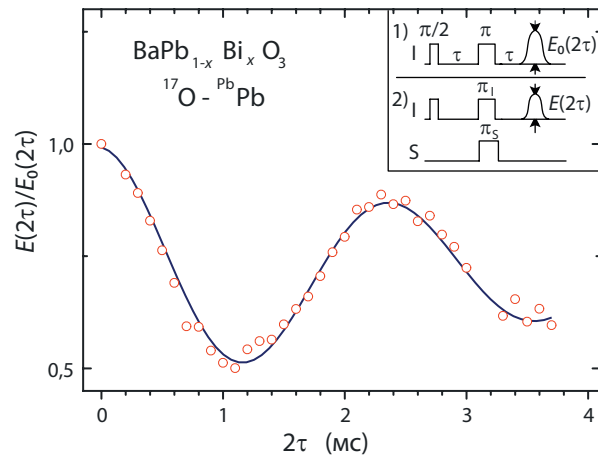


Рис.2.

Сигнал $m(2\tau) = ^{17}E(2\tau)/^{17}E_0(2\tau)$ в оксиде $Sr_{14}Cu_{24}O_{41}$ при $T=20\text{ K}$; сплошная линия – результат аппроксимации данных $m(2\tau)$ выражением вида: $m(2\tau) \sim \exp(-2\tau/T_2) \cdot \cos(J\tau) + b$
 на вставке: в верхней части - последовательность радиоимпульсов, возбуждающих спин-системы $I(^{17}\text{O})$ и $S(^{207}\text{Pb})$ в ходе экспериментов по двойному резонансу спинового эха.

ласти низких температур $T \leq 20\text{K}$, где имело место неравенство $^{17}T_2 \leq ^{207}T_1$. Эксперименты по двойному резонансу спинового эха проводились в два этапа. На первом этапе последовательность радиоимпульсов $(\pi/2)_1 - \tau - \pi_1$ прикладывалась на частоте $^{17}\nu_{01} = 56.4\text{ МГц}$ к спинам ^{17}O и в момент времени 2τ регистрировалась амплитуда спинового эха $^{17}E_0(2\tau)$. На втором этапе одновременно с импульсом π_1 прикладывался дополнительный π_5 -импульс на частоте ν_{05} ($^{207}\nu_{05} \approx 84\text{ МГц}$, $^{63}\nu_{05} \approx 107\text{ МГц}$), инвертирующий направление локальных полей от спинов ^{207}Pb . В результате амплитуда спинового эха $^{17}E(2\tau)$ в момент 2τ уменьшается по сравнению с $^{17}E_0(2\tau)$.

Сигнал двойного резонанса $m(2\tau)$ определяется отношением $m(2\tau) = ^{17}E(2\tau)/^{17}E_0(2\tau)$. Экспериментальные данные для оксида $BaPbO_3$, приведенные на рис.2, иллюстрируют основные особенности затухания сигналов $m(2\tau)$ для исследованных оксидов $BaPb_{1-x}Bi_xO_3$ в зависимости от времени задержки между импульсами τ . Зависимость $m(2\tau)$ имеет явно вы-

раженный осциллирующий характер с частотой $^{17-207}J_{\text{exp}} = 700(20)\text{ Гц}$, что и ожидается для почти изолированных пар ядер $^{170-207}\text{Pb}$ при малых концентрациях ЯМР изотопов, возбуждаемых в эксперименте. В случае гетероядерного спин-спинового взаимодействия необходимо учитывать вклад в J_{exp} константы дипольного взаимодействия J_{dip} , величина которой того же порядка, что и J_{ind} . Вклад J_{dip} может быть рассчитан: $^{17-207}J_{\text{dip}} = 360\text{ Гц}$. Тогда соответствующая константа КССВ равна $^{17-207}J_{\text{ind}} = 17-207J_{\text{exp}} - ^{17-207}J_{\text{dip}} = 340\text{ Гц}$. В рамках модели Рудермана-Киттеля и вычисленного значения $(2k_F a)$ отношение $(J^{\text{Pb-Pb}}/J^{\text{O-Pb}})_{\text{расч}} = (32 \pm 1)$. Близость этого отношения к экспериментально полученной величине $(J^{\text{Pb-Pb}}/J^{\text{O-Pb}})_{\text{экспер}} = (35 \pm 3)$, может служить одним из обоснований для описания электронных состояний в металлической фазе оксидов $BaPb_{1-x}Bi_xO_3$ в рамках модели нормальной метал-ла поверхностью Ферми близкой к сферической.

Более подробно с представленными результатами и выводами можно ознакомиться в публикациях [2-5].

¹ Froidevaux C. and Weger M., Phys. Rev. Lett., 12, (1964) 123

² Piskunov Yu., Mikhalev K., Trokiner A., et. al., Phys. Rev. B, 65, 134518 (2002)

³ Погудин А.В., Оглобличев В.В., Пискунов Ю.В., Герашенко А.П., Верховский С.В. и др., Письма в ЖЭТФ, 80, (2004) 124

⁴ Оглобличев В.В., Погудин А.В., Пискунов Ю.В., Верховский С.В. и др., Письма в ЖЭТФ, 82, (2005) 86

⁵ Верховский С. В., Погудин А. В., Карькин А. Е., Оглобличев В. В., Гощицкий Б. Н., ФММ, 100 (2005) 468