

УДК 537.622.4+544.225

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ СПЛАВОВ $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{Si}_y$ МЕТОДОМ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

**Д.Ю. Карпенков¹, Ф.О. Денисов¹, К.П. Скоков², Э.Л. Айриян¹,
А.Ю. Карпенков¹, Ю.Г. Пастушенков¹**

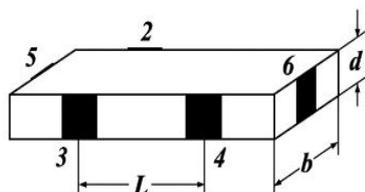
¹Тверской государственный университет
Кафедра магнетизма

²Технический университет Дармштадта, Дармштадт, Германия

Электронная структура соединений $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{Si}_y$ была изучена методом исследования аномального и нормального эффекта Холла в широком интервале полей и температур. Установлено, что для сплавов, характеризующимся переходом первого рода, основным механизмом проводимости является дырочный. При приближении к точке Кюри наблюдается тенденция к смене знака нормального эффекта Холла. При замещении атомов Fe на Co происходит смена проводимости на электронную. Аномальный эффект Холла в данных соединениях в основном определяется вкладом от внешнего механизма косоугольного рассеяния.

Ключевые слова: аномальный и нормальный эффект Холла, электронная структура, материалы для магнитного охлаждения.

Сплавы системы $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ считаются одними из наиболее перспективных для применения в качестве хладагентов в магнитных рефрижераторах. Гигантский магнитокалорический эффект в данных соединениях обусловлен термически- и магнитно-индуцированным метамагнитным фазовым переходом первого рода из пара- в ферромагнитное состояние [1; 2]. Наряду с большим изменением энтропии ΔS высокая хладоемкость материалов объясняется особенными деталями фазового перехода: этой системе присущ слабый гистерезис благодаря наличию гладкой поверхности на зависимости свободной энергии электронов от магнитного момента и нескольких минимумов [3]. Однако в сплавах типа $\text{LaFe}_{13-x}\text{Si}_x$ экспериментально наблюдается гистерезис [1; 4] и недавно он был объяснен необратимыми изменениями микроструктуры [5]. Замещение атомов железа атомами кобальта приводит к смене рода фазового перехода и, как следствие, к исчезновению гистерезиса [6; 7]. Поэтому изучение деталей электронной структуры системы соединений $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{Si}_y$ является актуальной задачей.



Р и с. 1. Расположение контактов на образце

В данной работе электронная система была изучена методом исследования аномального и нормального эффекта Холла в широком интервале полей и температур.

Методика эксперимента.

Поликристаллические образцы сплавов $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{Si}_y$ были произведены Vacuumschmelze (Ханау, Германия). Измерения намагниченности, электрического удельного сопротивления и эффекта Холла были выполнены на установке Physical Properties Measurement System (PPMS-14).

Исследования транспортных свойств образцов проводилось четырехконтактным методом. Измерения были выполнены на образце в форме параллелепипеда (рис. 1), имеющем два торцовых контакта и три боковых. Контакты 5 и 6 служили для пропускания тока через образец. Для проведения измерения удельной электропроводности образца на боковой поверхности образца имелись контакты 3 и 4, которые служили для измерения продольного падения напряжения U_{34} на расстоянии L между контактами. Зная напряжение U_{34} , расстояние L , ширину b и толщину d образца можно рассчитать величину удельной электропроводности σ :

$$\sigma = \frac{I L}{U_{34} b \cdot d}. \quad (1)$$

При измерении поперечной разности потенциалов следует учитывать, что при расположении контактов 2 и 3 на линии, не строго перпендикулярной оси тока, между ними возникает продольное напряжение. Для устранения его влияния на точность определения э.д.с. Холла поперечное напряжение измеряют при двух противоположных направлениях пропускаемого тока. Тогда э.д.с. Холла равна $U_H = \frac{|U_{+23}| + |U_{-23}|}{2}$, где U_{+23} и U_{-23} – поперечные напряжения при противоположных направлениях тока. Постоянная Холла рассчитывалась по формуле (2):

$$R_H = \frac{U_H b}{I B}. \quad (2)$$

Результаты измерений и обсуждение. Сопротивление Холла в ферромагнетиках обычно представляется в виде суммы двух членов:

$$\rho_H = R_0 B_Z + 4\pi R_s M_Z \quad (2)$$

где первый описывает нормальный эффект Холла (НЭХ), обусловленный действием силы Лоренца, а второй характеризует аномальный эффект Холла (АЭХ), связанный с действием спин-орбитального взаимодействия (СОВ), M_z компонента намагниченности вдоль оси z , B_z – компонента магнитной индукции,

$$B_z = H_z + 4\pi M_z(1 - N) \quad (3)$$

где $0 < N < 1$ – размагничивающий фактор образца, а R_0 и R_S называют константами НЭХ и АЭХ.

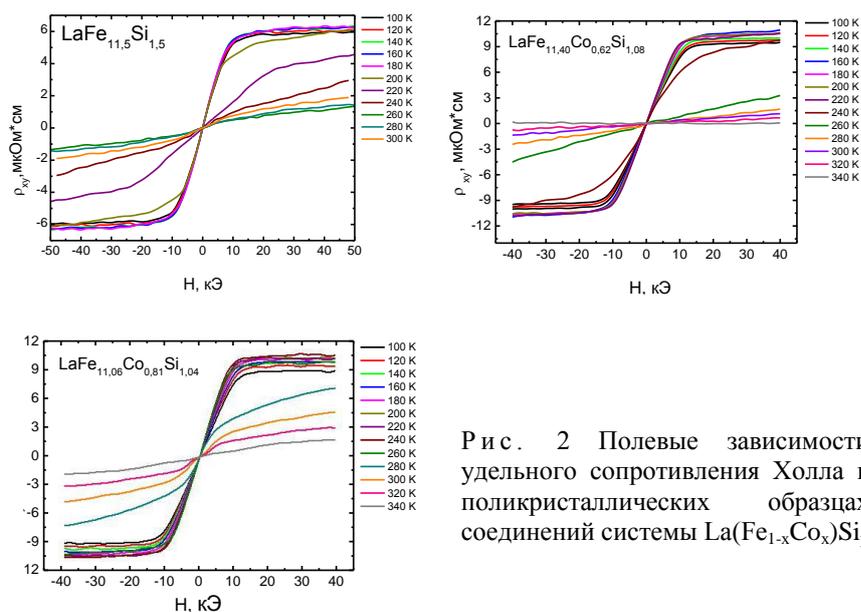
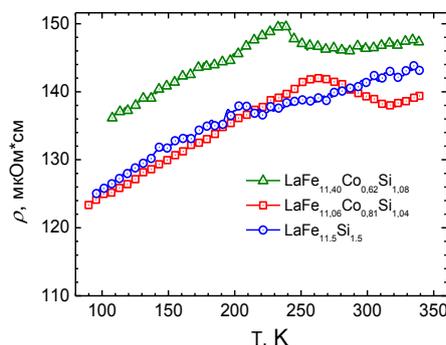


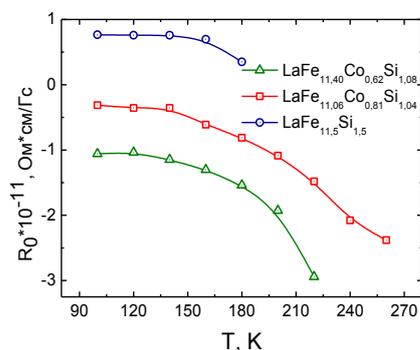
Рис. 2 Полевые зависимости удельного сопротивления Холла в поликристаллических образцах соединений системы $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{Si}_y$

На рис. 2 представлены полевые зависимости удельного сопротивления Холла для поликристаллических образцов соединений $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{Si}_y$. Как видно из графиков, основной вклад в измеренные значения ρ_{xy} объясняется аномальным эффектом Холла, так как нормальный вклад в эффект Холла в данных образцах незначителен.

Вначале рассмотрим влияние замещения атомов железа атомами кобальта на нормальный эффект Холла. Вид холловской кривой в нашем случае типичен для ферромагнитных металлов, что позволяет по стандартной методике [8] разделить вклады нормального и аномального эффектов. Для простоты будем считать, что $B_z = H_z$, то есть пренебрежем отличием размагничивающего фактора от единицы за счет конечной толщины образца по сравнению с его размером в плоскости. Тогда по наклону кривой в сильных полях, когда вклад АЭХ уже насыщен и не зависит от поля, получаем значение R_0 (рис. 4). Стоит отметить, что от



Р и с . 3. Зависимости удельного электросопротивления от температуры

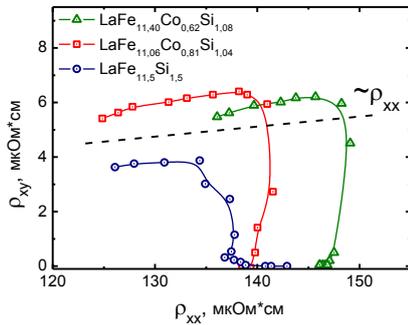


Р и с . 4. Температурные зависимости коэффициента нормального эффекта Холла

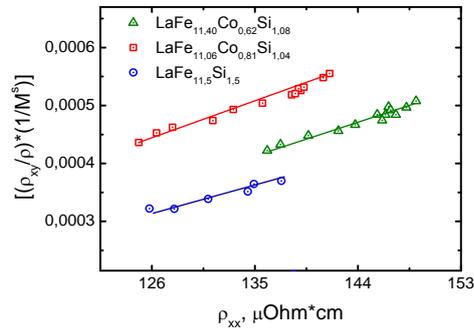
знака носителей тока будет зависеть знак возникающей э.д.с. Холла, т. е. по знаку э.д.с. Холла возможно определение типа носителей тока. Температурная зависимость R_0 для соединения $\text{LaFe}_{11.5}\text{Si}_{1.5}$, в котором наблюдается фазовый переход первого рода, свидетельствует о плавной трансформации поверхности Ферми при повышении температуры с постепенным уменьшением роли дырочных поверхностей. Поскольку сопротивление при этом не зависит от температуры (рис. 3), суммарная концентрация носителей тока не изменяется, а изменяется соотношение между электронными и дырочными частями поверхности Ферми. Наблюдается уменьшение роли дырочной проводимости в парамагнитной фазе. Однако следует подчеркнуть, что в непосредственной окрестности метамагнитного перехода, где определение коэффициента R_0 становится невозможным из-за отсутствия насыщения, изменение знака на отрицательный для исследованного состава нами не найдено.

Стоит отметить, что для сплавов $\text{LaFe}_{11.40}\text{Co}_{0.62}\text{Si}_{1.08}$ и $\text{LaFe}_{11.06}\text{Co}_{0.81}\text{Si}_{1.04}$ наблюдается смена знака коэффициента НЭХ на отрицательный. Это объясняется замещением части атомов железа атомами кобальта. Данный эффект согласуется с известными литературными данными по исследованию эффекта Холла в железо-кобальтовых сплавах [10; 11].

Теперь рассмотрим аномальный эффект Холла. В настоящее время рассматриваются три конкурирующих механизма АЭХ: механизм Карплюса Латтинжера (КЛ), асимметричное рассеяние (skew scattering) и механизм бокового смещения (side jump). Для разделения вклада каждого механизма в общее значение АЭХ использовался подход, описанный в работах [8; 9].



Р и с . 5. Зависимость удельного сопротивления Холла от удельного электросопротивления для поликристаллов $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{Si}_y$



Р и с . 6. График зависимости $(\rho_{xy}/\rho)[M_s^0/M_s(T)]$ от ρ для для поликристаллов $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{Si}_y$

На рис. 5 приведен график зависимости сопротивления Холла для $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{Si}$ от продольного удельного сопротивления ρ , для $\rho_{xy}(T)$ и $\rho(T)$. Экспериментальные значения ρ_{xy} получены путем экстраполяции данных сопротивления Холла. Как видно из графиков изменения $\rho_{xy}(\rho)$, удельное сопротивление Холла изменяется почти линейно с увеличением ρ для всех исследуемых образцов в диапазоне температур $T < T_C$.

Рассмотрим соотношение между АЭХ и продольным сопротивлением в виде $\rho_{xy} = a'(M_s)\rho + b'(M_s)\rho^2$. Коэффициенты $a'(M_s)$ и $b'(M_s)$ являются некоторыми функциями спонтанной намагниченности. Первое слагаемое определяется вкладом от косоуго рассеяния. С помощью простого приближения $a'(M_s) = a(M_s(T))/M_s^0$ и построения графика $(\rho_{xy}/\rho)[M_s^0/M_s(T)]$ от ρ можно получить коэффициент a . Здесь $M_s^0 = M_s(T=0)$. Второй член представляет собой внутренний вклад, в частности, АХП $\sigma_{xy} = \rho_{xy}/\rho^2$ определяется $b'(M_s)$.

Зависимости $(\rho_{xy}/\rho)[M_s^0/M_s(T)]$ от ρ для образцов сплавов $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{Si}$ показаны на рис. 6. Видно, что эта величина линейно зависит от ρ для всех исследованных сплавов. Анализ показывает, что АЭХ в данных соединениях в основном определяется вкладом от внешнего механизма косоуго рассеяния.

Таким образом в ходе выполнения исследований были проведены измерения температурных зависимостей эффекта Холла. Установлено, что для сплавов, характеризующихся переходом первого рода, основным механизмом проводимости является дырочный. При приближении к точке Кюри наблюдается тенденция к смене знака нормального эффекта Холла. При замещении атомов Fe на Co происходит смена проводимости на электронную. Исследование

аномального эффекта Холла показало, что в данных соединениях он в основном определяется вкладом от внешнего механизма косоугольного рассеяния.

Список литературы

1. Fujita A., Fujieda S., Hasegawa Y. and Fukamichi K. // Phys. Rev. B. 2003. V. 67. P.104416.
2. Lyubina J., Nenkov K., Schultz L. and Gutfleisch O. // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 101. P.177203.
3. Kuz'min M. D. and Richter M. // Phys. Rev. B. 2007. V. 76. P. 092401.
4. Katter M. и др. // IEEE Trans. Magn. 2008. V. 44. P. 3044.
5. Moore J. D., и др. // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95. P. 252504.
6. Liu X. B., Liu X. D., Altounian Z., Tu G. H. // J. Alloys Compd. 2005. V. 397. P. 120.
7. Hu F.X., Gao J., Qian X.L., Ilyn M., Tishin A.M., Sun J.R., Shen B.G. // J. Appl. Phys. 2005. V. 97. P. 10M303.
8. Вонсовский С.В. Магнетизм/ М.: Наука, 1971. 1032 с.
9. Simon Foner and Emerson M. // Physical review. 1953. V. 91. №1.
10. Tanaka T., Ataka T., Kunii M., Takahashi M., and Wakiyama T. // IEEE Translation Journal on Magnetism in Japan. 1991. V.6. №11.
11. Sales B. C., Jin R., and Mandrus D. // Physical Review B. 2008. V. 77. Issue 2. 024409.
12. Nozieres P., Lewiner C. // Journal de Physique. 1973. V. 34. P. 901 – 915.

INVESTIGATION OF THE ELECTRON STRUCTURE OF $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{Si}_y$ COMPOUNDS BY MEANS OF HALL EFFECT

**D.Yu. Karpenkov¹, F.O. Denisov¹, K.P. Skokov², E.L. Airiyan¹,
A.Yu. Karpenkov¹, Yu.G. Pastushenkov¹**

¹Tver State University
Department of Magnetism

²Technical University of Darmstadt, Darmstadt, Germany

Investigation the electron structure of $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)\text{Si}_y$ compounds was studied by means of anomalous and normal Hall effect in a wide range of magnetic field and temperatures. It was found that for alloys, characterized with the first order transition from ferromagnetic state to paramagnetic state, the main mechanism of conductivity is hole conductivity. In the vicinity of the Curie point the sign of normal Hall effect coefficient tends to change. With the substitution of iron atoms with cobalt in these compounds together with change of order of phase transition a change to the electron conductivity is observed. Anomalous Hall effect in these compounds is mainly determined by the contribution from the external skew scattering mechanism.

Keywords: *anomalous and normal Hall effect, the electronic structure, materials for magnetic refrigeration.*

Об авторах:

КАРПЕНКОВ Дмитрий Юрьевич – кандидат физико-математических наук, ведущий инженер кафедры магнетизма физико-технического факультета ТвГУ, karpenkov_d_y@mail.ru

ДЕНИСОВ Федор Олегович – студент 2 курса магистратуры физико-технического факультета ТвГУ, macbetden@yandex.ru,

СКОКОВ Константин Петрович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Технического университета Дармштадта, Skokov_k_P@mail.ru

АЙРИЯН Эдуард Львович – аспирант физико-технического факультета ТвГУ, eduard_airyuan@mail.ru,

КАРПЕНКОВ Алексей Юрьевич – кандидат физико-математических наук, инженер управления по научным исследованиям ТвГУ, karpenkov_alex@mail.ru

ПАСТУШЕНКОВ Юрий Григорьевич – профессор, доктор физико-математических наук, зав. кафедрой магнетизма ТвГУ, upast@mail.ru