

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу Семянниковой Алены Александровны «Электронные и магнитные свойства сплавов Гейслера на основе кобальта», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Актуальность работы

Интерметаллические соединения с составом X_2YZ либо XYZ , называемые сплавами Гейслера, интересны в связи с необычным сочетанием свойств и связанных с ними эффектами: сверхупругость, сверхпластичность, гигантский магнитокалорический эффект, эффект гигантского магнитосопротивления, эффект памяти формы. Современный всплеск интереса к этим материалам связан с перспективами их использования в спинтронике, поскольку, в некоторых сплавах Гейслера, предсказана, а затем и обнаружена, высокая поляризация носителей заряда по спину (так называемые полуметаллические ферромагнетики и спиновые бещелевые полупроводники). К данным материалам принадлежат серии сплавов Co_2YSi и Co_2MnZ исследованные в данной работе. В сочетании с высокой намагниченностью и температурой Кюри, заметно превышающей комнатную температуру, это резко повышает привлекательность таких материалов для приложений в спинтронике. Поскольку данные особенности связаны со спецификой плотности состояний электронов вблизи уровня Ферми, одним из методов влияния на свойства является управление числом валентных электронов. Данная работа, направленная на изучение такого влияния с помощью изменения Y - и Z -компоненты несомненно актуальна.

Оценка проведенного исследования и полученных результатов

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее задачи, отмечена новизна, научное и практическое значение результатов, а также приведены сведения об апробации работы.

В 1-й главе представлен обзор исследований сплавов Гейслера на основе Co . Раскрыты понятия полуметаллического ферромагнетика и спинового бещелевого полупроводника, рассмотрены, накопленные к настоящему моменту, сведения об их зонной структуре, об электронном транспорте и магнитных свойствах. Это позволило, в конце главы, обоснованно сформулировать задачу работы.

Во 2-й главе описан синтез исследуемых соединений Гейслера: индукционная и дуговая плавки с последующим отжигом. Дана информация о подходах и приборах

использованных для исследования образцов, а также приведены сведения по химической и структурной аттестации образцов. Здесь показано, что состав сплавов близок к Co_2YSi ($Y = \text{Ti, V, Cr, Mn, Fe}$) и Co_2MnZ ($Z = \text{Al, Si, Ga, Ge, Sn}$), при этом отклонения от стехиометрии невелики. Показано, что материалы однофазны, а структура и параметры решётки полученных поликристаллических сплавов близка к структуре и параметрам сплавов Гейслера данного состава исследованной другими группами.

В 3-й главе описываются результаты исследования электронных и магнитных свойств сплавов Co_2YSi ($Y = \text{Ti, V, Cr, Mn, Fe}$). С помощью исследования температурных зависимостей электросопротивления в диапазоне от температуры жидкого гелия до комнатной получена следующая информация. Количественно определенные величины коэффициентов и показателей в степенной зависимости сопротивления от температуры указывают на процессы рассеяния электронов проводимости на магнитных неоднородностях характерные для ферромагнитных сплавов, а также на наличие «щелевых» особенностей в энергетическом спектре. Продемонстрирована взаимосвязь между видом температурных зависимостей электросопротивления, величинами остаточного электросопротивления, спонтанной намагниченности, коэффициентами нормального и аномального эффекта Холла, концентрацией носителей тока, оптической проводимостью. Автор аргументирует, что это является следствием изменения плотности электронных состояний, сравнивая измеренные свойства с литературными данными по спиновой поляризации. Также обсуждается, что наблюдаемые изменения свойств в пределах данной серии являются следствием изменения числа валентных 3d-электронов, управляемого изменением компонента Y в исследованной серии сплавов, что, в свою очередь изменяет плотность электронных состояний на уровне Ферми.

В 4-й главе исследованы особенности поведения электронных, оптических, магнитных характеристик, а также эффекта Холла в сплавах Co_2MnZ при изменении элемента Z ($Z = \text{Al, Ga, Ge, Si, Sn}$). Такое варьирование состава позволяет изменять количество р-электронов. В результате исследований, проведенных по аналогии с серией главы 3 продемонстрирована корреляция между электрическими, магнитными и оптическими свойствами в зависимости от атомного номера элемента Z. Оказалось, что в полуметаллических ферромагнетиках Co_2MnSi и Co_2MnGe с атомными номерами Z-элементов 14 и 32, наблюдается сочетание относительно малого электросопротивления и достаточно большой спонтанной намагниченности. Автор обращает внимание, что эти сплавы характеризуются также высокой спиновой поляризацией.

Также, как и в предыдущей серии отмечена корреляция свойств с изменением плотности электронных состояний на уровне Ферми.

К наиболее важным **научным результатам**, полученным диссертантом, можно отнести следующее:

Систематически исследованы электронные транспортные характеристики, оптическая проводимость, спонтанная намагниченность сплавов Co_2YSi ($Y = \text{Ti}, \text{V}, \text{Cr}, \text{Mn}, \text{Fe}$) и Co_2MnZ ($Z = \text{Al}, \text{Si}, \text{Ga}, \text{Ge}, \text{Sn}$).

Продемонстрирована взаимосвязь свойств исследованных сплавов с плотностью электронных состояний вблизи уровня Ферми, а также со степенью спиновой поляризации.

Отмечу, что данное исследование носит комплексный характер, включая в себя приготовление образцов аттестацию состава и структуры, измерение электронных, оптических, магнитных характеристик, а также эффекта Холла. Эта комплексность является основанием считать полученную информацию **достоверной**, а выводы надежными.

В целом, полученные результаты дают экспериментальную базу для понимания влияния числа валентных 3d-электронов и p-электронов на свойства сплавов Гейслера на основе кобальта.

Практическая значимость работы

Установленные закономерности изменения свойств при изменении состава, температуры и магнитного поля для сплавов Гейслера на основе Co будут полезны при разработке новых функциональных элементов для систем сбора и обработки информации, например, для спинтроники.

В качестве **замечаний** можно отметить следующее.

1. Важным мотивом исследования сплавов Гейслера на основе Co является возможность достижения высокой спиновой поляризации электронов. В обзорной главе автор сообщает, что для этого желательно отсутствие спин-орбитального взаимодействия. В ферромагнитных сплавах спин-орбитальное взаимодействие является причиной возникновения магнитной кристаллографической анизотропии. Величину этой анизотропии для поликристаллического образца можно оценить из кривой намагничивания в области приближения к магнитному насыщению. К сожалению, возможность такой оценки не использована, несмотря на то, что кривые намагничивания сплавов были измерены до очень больших полей.
2. Обсуждение данных по кривым намагничивания и намагниченности практически не приводится. Например, для образца Co_2CrSi магнитного насыщения не

наблюдается даже в максимальном поле 60 кЭ. Это может означать, что в данном случае мы имеем дело не с ферромагнитным, как утверждается в работе, а с антиферромагнитным упорядочением. Из текста не ясно как определялась величина спонтанной намагниченности и восприимчивость парапроцесса. Можно обратить внимание, что поле насыщения, соответствующее максимуму второй производной по намагниченности, заметно изменяется в пределах серии Co_2YSi . Это поле дает альтернативный способ оценить изменение намагниченности материала в пределах серии. Так, например, можно заметить, что наибольшая величина этого поля реализуется в образцах Co_2FeSi обладающих наибольшей намагниченностью.

3. Исследуемые образцы характеризуются небольшими отклонениями от стехиометрии (в пределах 6 ат.%). Достаточно ли это для того, чтобы пренебрегать этими отклонениями, сопоставляя свойства с количеством электронов проводимости и атомным номером, рассчитанным в предположении идеальной стехиометрии, как это сделано на рис. 3.10÷3.15 и 4.10÷4.14? Интересно также, учитывались ли эти отклонения при расчете плотности электронных состояний?

Данные замечания носят рекомендательный либо дискуссионный характер и не портят общего положительного впечатления от очень интересной и очень емкой работы.

Общий вывод

Анализ диссертации Семянниковой А.А. позволяет сделать заключение о достаточно высоком научном уровне и практической значимости полученных в ней результатов. Материал подается автором в последовательности, продиктованной поставленной целью и раскрывающими ее задачами. Результаты работы хорошо опубликованы и прошли всестороннюю апробацию на российских и международных конференциях.

В целом, считаю, что работа Семянниковой А.А. представляет собой самостоятельное законченное исследование, в котором содержится решение важной научной задачи, связанной с систематическим исследованием электронных транспортных характеристик, оптической проводимости, спонтанной намагниченности сплавов Гейслера на основе кобальта. Автореферат полностью отражает содержание диссертации и представленные в ней выводы. Профиль диссертации соответствует формуле специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния. Диссертационная работа Семянниковой А.А. по своему научному уровню, значению и достоверности результатов полностью соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением

Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (в редакции от 26.05.2022 г. № 751 с изменениями от 18.03.2023 г. № 415), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Семянникова Алена Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий лабораторией физики магнитных плёнок

_____ Комогорцев Сергей Викторович

Дата: 16.10.2023

Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения
Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

Адрес: 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 38

Тел. +7(391) 243-26-35

Факс +7(391)243-89-23

E-mail: komogor@iph.krasn.ru

Ученый секретарь

Института физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской
академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН

к.ф.-м.н.

_____ Злотников А.О.

С отставкой оппонента.

26.10.2023

/ А.А. Семянникова

СВЕДЕНИЯ об официальном оппоненте

Фамилия, Имя, Отчество (полностью)	Место основной работы - полное наименование организации (с указанием полного почтового адреса, телефона (при наличии), адреса электронной почты (при наличии)), должность, занимаемая им в этой организации (полностью с указанием структурного подразделения)	Ученая степень (с указанием отрасли наук, шифра и наименования научной специальности, по которой им защищена диссертация)	Ученое звание (по специальности или по кафедре)
Комогорцев Сергей Викторович	<p>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН)</p> <p>Институт Физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, строение № 38 Телефон: +7(391) 243-26-35 Факс : +7(391) 243-89-23, dir@iph.krasn.ru, http://kirensky.ru), старший научный сотрудник Лаборатории физики магнитных пленок (komogor@iph.krasn.ru)</p>	Доктор физико-математических наук, 01.04.11 Физика магнитных явлений	Доцент по специальности «Физика магнитных явлений»
<p>[1] E.A. Denisova, L.A. Chekanova, S. V Komogortsev, Structure and Magnetic Properties of the FeCo – C Films Reduced by Carbohydrates, Semiconductors. 54 (2020) 1840–1842. https://doi.org/10.1134/S1063782620140079.</p> <p>[2] S.V. Komogortsev, V.A. Fel'k, O.A. Li, The magnetic dipole-dipole interaction effect on the magnetic hysteresis at zero temperature in nanoparticles randomly dispersed within a plane, J. Magn. Magn. Mater. 473 (2019) 410–415. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.10.091.</p> <p>[3] E.Y. Filatov, A. V. Zadesenets, S. V. Komogortsev, P.E. Plyusnin, A.A. Chepurov, S. V. Korenev, Study of CoxPt1-x nanoalloy formation mechanism via single-source precursors, Powder Diffr. (2019) 1–5. https://doi.org/10.1017/S0885715619000162.</p> <p>[4] S. V. Komogortsev, L.A. Chekanova, E.A. Denisova, A.A. Bukaemskiy, R.S. Iskhakov, S. V. Mel'nikova, Macro- and Nanoscale Magnetic Anisotropy of FeNi(P) Micropillars in Polycarbonate Membrane, J. Supercond. Nov. Magn. 32 (2019) 911–916. https://doi.org/10.1007/s10948-018-4772-y.</p> <p>[5] S. V Komogortsev, R.S. Iskhakov, V.A. Fel'k, Fractal Dimension Effect on the Magnetization Curves of Exchange-Coupled Clusters of Magnetic Nanoparticles, J. Exp. Theor. Phys. 128 (2019) 754–760. https://doi.org/10.1134/S1063776119040095.</p> <p>[6] E.A. Denisova, L.A. Chekanova, I. V Nemtsev, S. V Komogortsev, N.A. Shepeta, Soft magnetic FeCo</p>			

- films produced by green chemistry technique, *J. Phys. Conf. Ser.* 1582 (2020) 012077.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1582/1/012077>.
- [7] E. Yoo, A.Y. Samardak, Y.S. Jeon, A.S. Samardak, A. V. Ognev, S. V. Komogortsev, Y.K. Kim, Composition-driven crystal structure transformation and magnetic properties of electrodeposited Co–W alloy nanowires, *J. Alloys Compd.* 843 (2020) 155902.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155902>.
- [8] V.V. Balashev, K.S. Ermakov, A.Y. Samardak, A.V. Ognev, A.S. Samardak, S.V. Komogortsev, M.N. Volochaev, A.S. Tarasov, V.V. Korobtsov, Crystal texture-dependent magnetic and magnetotransport properties of half-metallic Fe₃O₄ films grown on oxidized Si substrates by reactive deposition, *J. Alloys Compd.* 815 (2020) 152398. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152398>.
- [9] S. V. Komogortsev, G.S. Krainova, N. V. Il'in, V.S. Plotnikov, L.A. Chekanova, I. V. Nemtsev, G.Y. Yurkin, R.S. Iskhakov, D.A. Yatmanov, Features of the Ferromagnetic Resonance of Amorphous FeSiBNbCu Ribbons with Different Compositions, *Inorg. Mater. Appl. Res.* 11 (2020) 177–180.
<https://doi.org/10.1134/S2075113320010219>.
- [10] Н.В. Ильин, В.С. Комогорцев, Г.С. Крайнова, В.А. Иванов, И.А. Ткаченко, В.В. Ткачев, В.С. Плотников, Р.С. Исхаков, Исследование температурной зависимости намагниченности быстрозакаленных сплавов Fe–Cu–Nb–Si–B, *Известия Российской Академии Наук. Серия Физическая.* 85 (2021) 1234–1238. <https://doi.org/10.31857/S0367676521090143>.
- [11] E.A. Denisova, L.A. Chekanova, S. V. Komogortsev, I. V. Nemtsev, R.S. Iskhakov, M. V. Dolgopолоva, Iron-Cobalt Coatings Produced Using an Eco-friendly Route, *J. Supercond. Nov. Magn.* (2021). <https://doi.org/10.1007/s10948-021-05964-1>.
- [12] L.A. Kuzovnikova, E.A. Denisova, I. V. Nemtsev, R.S. Iskhakov, S. V. Komogortsev, A.A. Kuzovnikov, V.K. Maltsev, N.A. Shepeta, MAGNETOSTRUCTURAL STUDY OF NANOSTRUCTURED AND AMORPHOUS BULK ALLOYS (Co–P)_{100–x}Cu_x, *J. Struct. Chem.* 62 (2021) 802–809. <https://doi.org/10.1134/S0022476621050164>.
- [13] S.V. Komogortsev, S.V. Stolyar, L.A. Chekanova, R.N. Yaroslavtsev, O.A. Bayukov, D.A. Velikanov, M.N. Volochaev, P.E. Eroshenko, R.S. Iskhakov, Square plate shaped magnetite nanocrystals, *J. Magn. Magn. Mater.* 527 (2021) 167730. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.167730>.
- [14] V.A. Fel'k, S. V. Komogortsev, Ferromagnetic resonance in a microtube, *J. Appl. Phys.* 129 (2021) 183904. <https://doi.org/10.1063/5.0045548>.
- [15] S. V Komogortsev, D.A. Balaev, A.A. Krasikov, S. V Stolyar, R.N. Yaroslavtsev, V.P. Ladygina, R.S. Iskhakov, Magnetic hysteresis of blocked ferrihydrite nanoparticles, *AIP Adv.* 11 (2021) 015329.
<https://doi.org/10.1063/9.0000111>.

Сведения удостоверяю:

Ученый секретарь

Института физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КИП СО РАН

к.ф.-м.н.

 Злотников А.О.