

УДК 541.6;541.49;54.057;544.176

ТОНКИЕ ПЛЕНКИ КЛАТРОХЕЛАТА КОБАЛЬТА(II) ДЛЯ УСТРОЙСТВ МОЛЕКУЛЯРНОЙ СПИНТРОНИКИ

© 2023 г. И. С. Злобин^{1, 2}, Р. Р. Айсин^{1, 2}, А. Н. Синельников^{1, 2},
В. В. Новиков^{1, 2}, Ю. В. Нелюбина^{1, 2, *}

¹Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская область, Россия

*e-mail: unelya@ineos.ac.ru

Поступила в редакцию 11.05.2022 г.

После доработки 15.07.2022 г.

Принята к публикации 27.07.2022 г.

При помощи спектроскопии УФ-вид. продемонстрирована возможность получения тонких пленок клеточного комплекса (клатрохелата) кобальта(II), претерпевающего температурно-индуцированный спиновый переход, методом термической возгонки, которые отличаются более высокой однородностью и термической стабильностью по сравнению с пленками, сформированными при помощи центрифугирования соответствующего раствора на поверхности подложки. В сочетании с данными сканирующей электронной микроскопии это позволило обнаружить зависимость температуры спинового перехода от способа получения пленок, а супрамолекулярной организации в этих пленках — от материала используемой подложки, что указывает на проявление клатрохелатами переходных металлов “эффекта спинтерфейса” на границе с металлическим электродом. Вместе с возможностью управления магнитными свойствами данного уникального класса координационных соединений методами молекулярного дизайна наличие такого эффекта открывает широкие возможности для создания на их основе устройств молекулярной спинтроники с настраиваемыми под нужды исследователя характеристиками.

Ключевые слова: клатрохелаты, комплексы кобальта(II), кристаллические пленки, молекулярная спинтроника, молекулярный магнетизм, спиновое состояние, УФ-вид. спектроскопия

DOI: 10.31857/S0132344X22700153, **EDN:** BNZPDR

Открытие гигантского магнитосопротивления в конце 80-х годов прошлого века [1, 2] позволило использовать спин электрона для хранения и обработки информации, что привело к появлению отдельной области микроэлектроники, занимающейся изучением спинового тока в различных устройствах — спинтроники [3, 4]. Созданные с ее помощью гетероструктуры, способные менять свою проводимость в зависимости от величины и направления внешнего магнитного поля [5], легли в основу устройств спиновой логики [6, 7], компонентов квантового компьютера [8, 9] и элементов для записи и считывания информации в современных компьютерах [10–13].

Долгое время во всех устройствах спинтроники применялись только неорганические материалы [14]. Однако внедрение органических материалов, обладающих существенно более долгими временами спиновой релаксации [15, 16] и способных менять характер проводимости под действием внешних факторов (например, температуры или облучении светом [16–19]), позволило существенно расширить спектр возможных применений спин-

тронных устройств [20–26]. Одним из наиболее важных достижений в данном направлении стало обнаружение так называемого “эффекта спинтерфейса”, из-за которого режим спинового транспорта в спинтронном устройстве [23, 27–29] сильно зависит от взаимодействия материала электрода с молекулами выбранного вещества. Ответвление спинтроники, занимающееся изучением устройств на основе органических и молекулярных материалов, получило название “молекулярная спинтроника” [14, 30].

Особый интерес для решения задач молекулярной спинтроники представляют комплексы переходных металлов, претерпевающие спиновый переход [31]. Демонстрируемая ими способность обратимо переключаться между низкоспиновым (НС) и высокоспиновым (ВС) состояниями под действием температуры, давления, излучения или другого внешнего воздействия открывает широкие возможности для изучения зависимости электрон-транспортных свойств спинтронного устройства от магнитного состояния иона металла и создания multifunctional устройств на ос-

нове координационных соединений подобного типа [31, 32]. Кроме того, молекулы таких комплексов нередко проявляют свойства постоянных магнитов, т.е. демонстрируют так называемый мономолекулярный магнетизм [33], что позволяет им непосредственно взаимодействовать со спином электрона и эффективно влиять на режим спинового тока в устройстве [19, 22, 34, 35].

Однако на данный момент применение в молекулярной спинтронике комплексов, претерпевающих спиновый переход, ограничивается теоретическими исследованиями устройств, состоящих из одной молекулы подобного комплекса [36, 37], реализация которых на практике является очень сложной задачей [38]. Напротив, основными препятствиями для создания устройств, в которых такие молекулы образуют сплошной слой, являются возможная “блокировка” спинового перехода при нанесении на подложку [39] и невысокая термическая стабильность большинства таких комплексов [19], которая не позволяет применять для их нанесения традиционно используемый при изготовлении спинтронных устройств метод термической возгонки в вакууме [16, 40, 41]. Для внедрения соединений со спиновым переходом в реальные устройства молекулярной спинтроники необходимо выработать подходы к их молекулярному дизайну с учетом возможного изменения их свойств в виде пленок [42–44], а также сформулировать рекомендации по способам получения тонких пленок с высокой однородностью и термической стабильностью. Кроме того, исследование свойств таких пленок на металлических подложках может позволить предсказать проявление “эффекта спинтерфейса” и оценить эффективность выбранных соеди-

нений в устройствах молекулярной спинтроники [29, 31].

Для решения этих задач мы выбрали класс клеточных комплексов (клатрохелатов) переходных металлов [45], многие из которых претерпевают температурно-индуцированный спиновый переход [46] или проявляют мономолекулярный магнетизм [47–49]. Кроме того, они отличаются высокой термической и химической стабильностью, простотой получения и широкими возможностями химической модификации, позволяющими управлять их магнитными свойствами [50] введением различных заместителей в апикальные и реберные положения клеточного лиганда и наносить их на подложки [51].

В настоящей работе для одного из представителей данного ряда — *трис*-диоксиматного комплекса $\text{Co}(\text{Cl}_2\text{Gm})_3(\text{Bn}-\text{C}_4\text{H}_9)_2$ (I) [52], в котором ион кобальта(II) инкапсулирован клеточным лигандом с атомами хлора и бутильными группами в качестве реберных и апикальных заместителей соответственно (схема 1), — термической возгонкой мы получили тонкие пленки на подложках, выполненных из кварцевого стекла и серебра, что позволило изучить супрамолекулярную организацию молекул выбранного комплекса I в зависимости от материала подложки при помощи сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Спиновое состояние комплекса, который ранее претерпевал температурно-индуцированный спиновый переход в объемных кристаллических образцах и пленках, полученных центрифугированием соответствующего раствора [53], изучены при помощи спектроскопии УФ-вид.

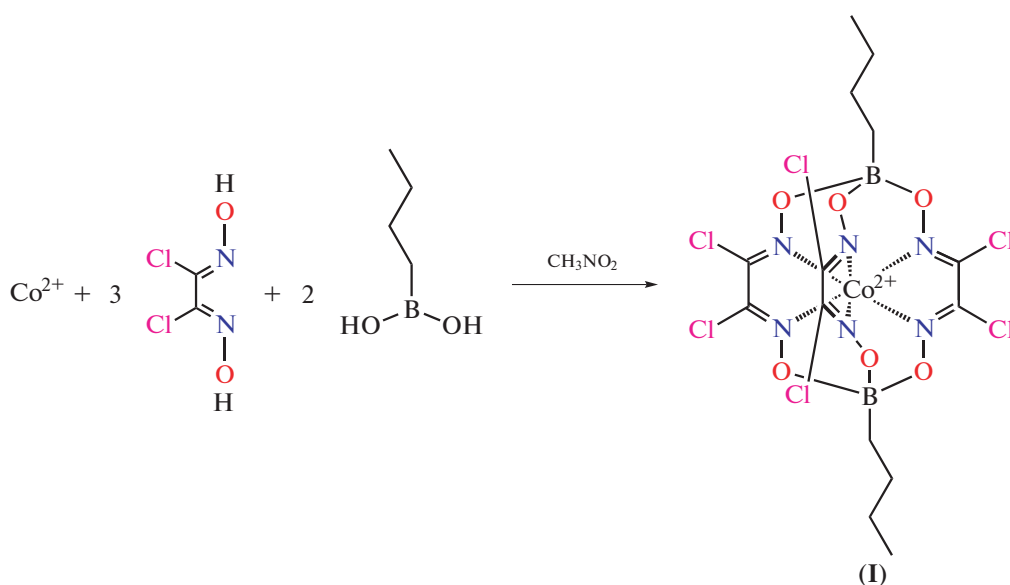


Схема 1.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Все операции выполняли на воздухе с использованием коммерчески доступных органических растворителей, перегнанных в атмосфере аргона. *n*-бутилборную кислоту $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_3\text{B}(\text{OH})_2$ (Sigma-Aldrich) чистотой 97% использовали без дополнительной очистки. Дихлорглюксим получали по ранее описанной методике [52]. Анализ на углерод, азот и водород проводили на микроанализаторе Carlo Erba, модель 1106. Спектры ЯМР ^1H и ^{13}C регистрировали в CD_2Cl_2 на спектрометре Bruker Avance 400 (с рабочей частотой для протонов 400 МГц). Значения химических сдвигов в спектрах определяли относительно остаточного сигнала данного растворителя.

Синтез комплекса I. Дихлорглюксим (5.5 г, 35 ммоль) и *n*-бутилборную кислоту (2.6 г, 26 ммоль) растворяли/суспендировали в сухом кипящем нитрометане (50 мл) при перемешивании в атмосфере аргона, после чего постепенно добавляли CoCl_2 (1.3 г, 10 ммоль). Полученную реакционную смесь кипятили с обратным холодильником при перемешивании в течение 8 ч, затем частично отгоняли растворитель и охлаждали до комнатной температуры. Мелкокристаллический коричневый продукт отфильтровывали, последовательно промывали этанолом, диэтиловым эфиром и гексаном, а затем высушивали в вакууме. Выход 1.7 г (26%).

ЯМР ^1H (CD_2Cl_2 ; 400 МГц; 290 К; δ , м.д.): 9.03 (с., 6H, CH_3), 15.18 (с., 4H, CH_2), 25.82 (с., 4H, CH_2), 36.52 (с., 4H, BCH_2).

Найдено, %: C 25.47; H 2.73; N 12.74.

Для $\text{C}_{14}\text{H}_{18}\text{B}_2\text{N}_6\text{O}_6\text{Cl}_6\text{Co}$

вычислено, %: C 25.42; H 2.74; N 12.73.

Получение пленок комплекса I. Предварительно готовили подложку для нанесения пленок комплекса I. Для этого на подложку, наполовину закрытую непроницаемым экраном, напыляли серебро (при токе 15 мА, напряжении 460 В в течение 15 мин, давлении 10^{-2} Торр и расстоянии от серебряной мишени 30 мм). Далее, сухой кристаллический порошок комплекса I (3 мг) напыляли на кварцевую подложку, расположенную на расстоянии 20 мм от тигля с порошком, в вакуумной камере при давлении 10^{-5} Торр и температуре 245°C. На подготовленную подложку с серебром, расположенную на расстоянии 20 мм, сухой кристаллический порошок комплекса (3 мг) напыляли при давлении 10^{-5} Торр и температуре 245°C в течение 20 мин. Ось тигля с веществом в процессе

напыления находилась посредине границы раздела фаз серебро–стекло.

Спектры УФ-вид. полученных пленок регистрировали в области 200–900 нм с использованием спектрофотометра Carl Zeiss Jena Specord M400 в вакуумном криостате (10^{-2} Торр) в диапазоне температур от –178 до 80°C с шагом 20°C.

Изображения СЭМ пленок на подложках, помещенных на 25-миллиметровый алюминиевый столик и закрепленных проводящей углеродной лентой, получали в режиме обратно рассеянных электронов при ускоряющем напряжении 5 кВ с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM4000Plus.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Синтез выбранного *трис*-диоксиматного клатрохелата кобальта(II) (I) проводили по описанной ранее методике [52] прямой темплатной реакцией дихлорглюксима, *n*-бутилборной кислоты и безводного хлорида кобальта(II) в жестких условиях (при кипячении в нитрометане) из-за низкой донорной способности дихлорглюксима (схема 1). Пленки данного комплекса на поверхности оптически прозрачных (кварцевых) подложек, используемых для регистрации спектров УФ-вид., получали путем нагревания его мелкокристаллического порошка в вакуумной камере до температуры 245°C при давлении 10^{-5} Торр. Такой метод формирования пленок обеспечил их однородность и равновесность, о чем свидетельствовали данные СЭМ (рис. 1) и спектроскопии УФ-вид. в диапазоне температур от –178 до 80°C (рис. 2). Действительно, при их повторном охлаждении/нагревании (рис. 2) не происходило изменения базовой линии, интенсивности поглощений или общей контрастности спектра УФ-вид. при той же температуре. О сохранении комплексом I своей структуры и состава на поверхности в условиях вакуумного криостата (10^{-2} Торр) свидетельствовала неизменность спектров УФ-вид. при комнатной температуре и их сходство с соответствующими спектрами для объемных кристаллических образцов и пленок, ранее полученных при помощи центрифугирования соответствующего раствора [53]. Кроме того, при охлаждении вплоть до –178°C не происходило растрескивания пленок, вызванного кристаллизацией комплекса I.

Данные спектроскопии УФ-вид. также однозначно указывали на то, что термическая возгонка в вакууме позволяет получать более стабильные пленки комплекса I, чем центрифугирование раствора. В последнем случае комплекс деградировал уже при нагревании до 60°C, тогда как в пленках, полученных термической возгонкой, признаков такой деградации не наблюдалось вплоть до температуры 80°C и при последующем охлаждении, и

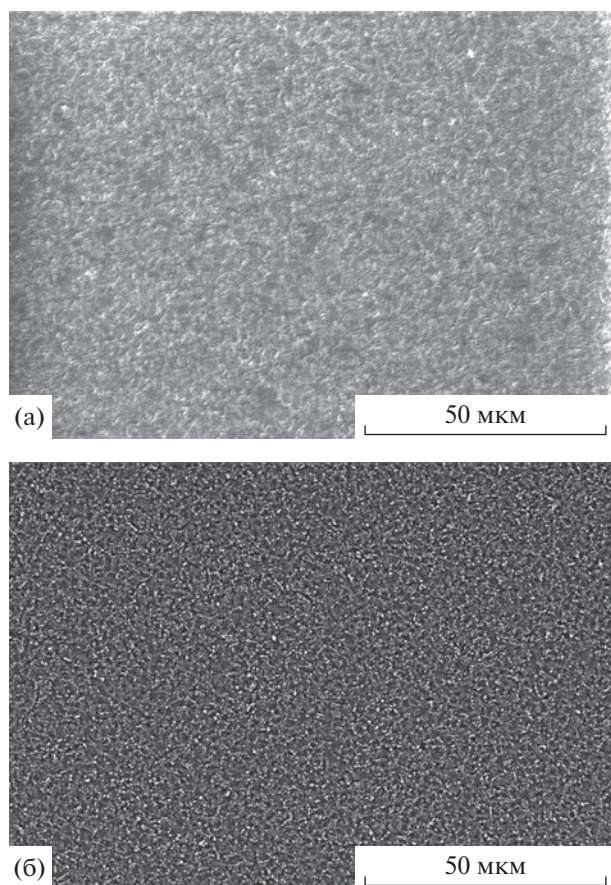


Рис. 1. Изображение сканирующей электронной микроскопии для фрагмента поверхности пленки комплекса I, нанесенной на кварцевую (а) и на серебряную (б) подложки.

вид спектра УФ-вид. возвращался к исходному (рис. 2). Подобное различие в термической стабильности может быть вызвано водой, оставшейся в пленках клатрохелата I, полученных центрифугированием раствора, после выпаривания растворителя (ацетонитрила) на воздухе.

При комнатной температуре спектры УФ-вид. пленок обоих типов [53] соответствовали смеси состояний НС и ВС комплекса I, при этом соответствующие им полосы поглощения металл–лиганд в видимой части спектра с максимумом около 470 нм накладывались. Следует отметить, что установление равновесия ВС–НС в пленках, сформированных возгонкой в вакууме, происходило быстрее, так как повторная регистрация спектра УФ-вид. при той же температуре через 5 мин полностью воспроизводила первую. Это дополнительно свидетельствует о преимуществах вакуумной возгонки перед центрифугированием раствора для создания однородных равновесных и термически стабильных пленок, которые необходимы для практического применения клатрохелатов переходных металлов в

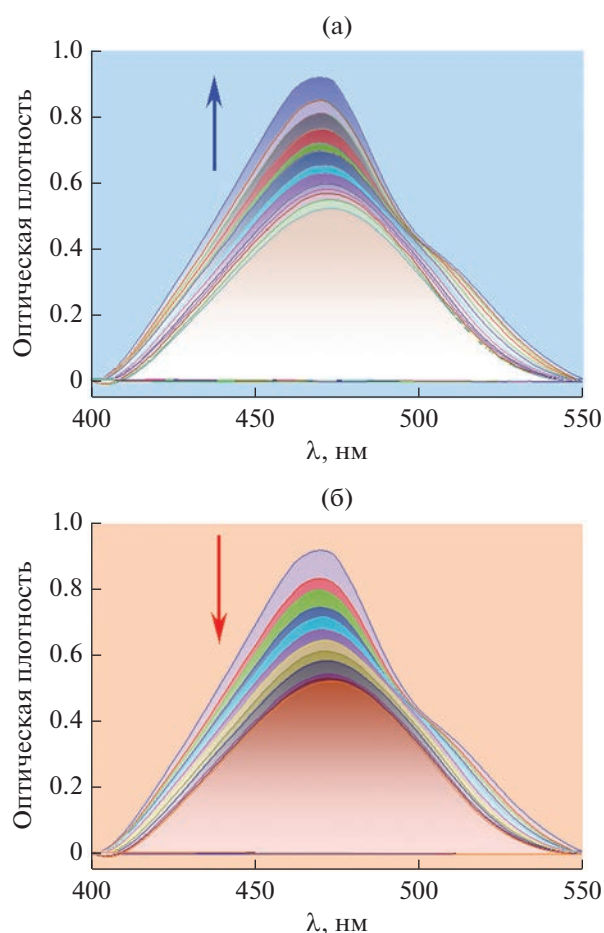


Рис. 2. Температурная зависимость спектров УФ-вид. пленки комплекса I, полученной термической возгонкой, при охлаждении от 80 до -178°C (а) и последующем нагревании (б).

реальных устройствах молекулярной спинтроники [54–56].

Для сравнения параметров температурно-индуцированного спинового перехода комплекса I в двух типах пленок мы провели анализ зависимости пиковой интенсивности полосы поглощения металл–лиганд в спектрах УФ-вид. от температуры (рис. 3). Хотя в обоих случаях спиновый переход растянут по температуре и не завершен во всем исследованном температурном диапазоне, в пленке, полученной термической возгонкой в вакууме, он более ярко выражен, выглядит более полным и происходит при более низкой температуре (200 против 220 К). Стоит заметить, что наблюдаемый гистерезис между охлаждением и нагреванием, который составляет около $20\text{--}25^{\circ}\text{C}$, не зависит от способа формирования пленки.

Для исследования однородности и супрамолекулярной организации комплекса I в пленках на подложках разной природы (металлической и аморфной), анализ влияния которого может при-

вести к более глубокому пониманию “эффектов спинтерфейса” в будущих устройствах молекулярной спинтроники, на предметное стекло, наполовину закрытое непроницаемым экраном, наносили слой серебра при помощи магнетронного распыления. Чтобы обеспечить одинаковую толщину пленки на обеих подложках (~500 нм), предметное стекло помещали над тиглем с мелкокристаллическим порошком комплекса I так, чтобы ось тигля проходила по центру границы раздела фаз серебро–стекло.

Исследование топографии поверхности полученных пленок при помощи СЭМ выявило существенную разницу в супрамолекулярной организации комплекса I в пленках на поверхности стеклянной (рис. 1а) и серебряной подложки (рис. 1б). При этом обе пленки обладают очень высокой однородностью без каких-либо крупных кристаллических образований или трещин, и пленка на поверхности серебра демонстрирует значительно более высокую упорядоченность, чем на стеклянной подложке. Данный факт свидетельствует о существенном влиянии взаимодействия между молекулами комплекса I и подложкой на характер образуемой пленки даже при ее макроскопической толщине (~500 нм).

К сожалению, проследить температурно-индуцированные спиновый переход в пленке комплекса I на поверхности серебра и возможную зависимость параметров такого перехода от материала подложки при помощи спектроскопии УФ-вид. или спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения не представляется возможным из-за слишком большой излучательной способности серебряной подложки, на фоне которой сигналы комплекса I неразличимы.

Таким образом, совместное использование спектроскопии УФ-вид. и метода СЭМ позволило продемонстрировать возможность получения тонких однородных пленок для уникального класса комплексов переходных металлов (клатрохелатов), претерпевающих температурно-индуцированный спиновый переход путем их термической возгонки. В отличие от центрифугирования раствора [53] на поверхности подложки такой способ формирования пленок клатрохелата кобальта(II) обеспечил его более высокую термическую стабильность, а также помог добиться более полного спинового перехода при более низкой температуре, что является желательным для большинства практических применений [54–56] комплексов со спиновыми переходами, в том числе в молекулярной спинтронике.

Кроме того, анализ полученных таким образом пленок выбранного комплекса на серебряной и стеклянной подложках позволил выявить существенную разницу в его супрамолекулярной организации на поверхности этих двух материалов, указывая на важную роль взаимодействий на грани-

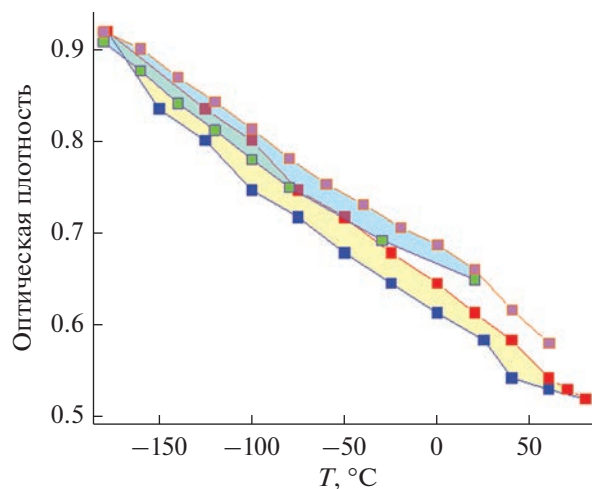


Рис. 3. Температурная зависимость интенсивности полосы поглощения металл–лиганд около 470 нм при нагревании и охлаждении пленок комплекса I, полученных термической возгонкой при температуре (красная и синяя линии) и путем центрифугирования раствора (розовая и голубая линии).

це раздела фаз подложка–клатрохелат в формировании слоя данного молекулярного соединения и его свойств. Подобное наблюдение позволяет выдвинуть предположение о возможности клатрохелатов переходных металлов проявлять “эффект спинтерфейса” на границе с электродом в устройствах молекулярной спинтроники. Однако подтверждение этой гипотезы требует более детального исследования свойств соответствующих тонких пленок на различных металлических подложках, традиционно используемых в молекулярной спинтронике, которое в данный момент проводится в нашей научной группе.

Благодаря тому, что клатрохелаты переходных металлов позволяют варьировать в широком диапазоне магнитные свойства путем направленной функционализации клеточного лиганда и подбором иона переходного металла, предполагаемая возможность образования ими “спинтерфейса” на поверхности металлического электрода может позволить создать на основе данного уникального класса координационных соединений разнообразные устройства молекулярной спинтроники с настраиваемыми под конкретные нужды характеристиками.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Элементный анализ полученного комплекса проведен с использованием оборудования Центра исследования строения молекул ИНЭОС РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Авторы также выражают бла-

годарность докт. хим. наук А.С. Белову (ИНЭОС РАН) за синтез клатрохелата кобальта(II) по литературной методике.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-73-10194).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Baibich M.N., Broto J.M., Fert A. et al. // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 61. № 21. P. 2472.
2. Binasch G., Grünberg P., Saurenbach F. et al. // Phys. Rev. B. 1989. V. 39. № 7. P. 4828.
3. Žutić I., Fabian J., Das Sarma S. // Rev. Mod. Phys. 2004. V. 76. № 2. P. 323.
4. Wolf S.A., Chtchelkanova A.Y., Treger D.M. // IBM J. Res. Dev. 2006. V. 50. № 1. P. 101.
5. Wolf S.A., Awschalom D.D., Buhrman R.A. et al. // Science. 2001. V. 294. № 5546. P. 1488.
6. Ney A., Pampuch C., Koch R. et al. // Nature. 2003. V. 425. № 6957. P. 485.
7. Dery H., Dalal P., Cywiński Ł., Sham L.J. // Nature. 2007. V. 447. № 7144. P. 573.
8. Burkard G., Engel H.A., Loss D. // Fortschr. Phys. 2000. V. 48. № 9–11. P. 965.
9. Clemente-Juan J.M., Coronado E., Gaita-Ariño A. // Chem. Soc. Rev. 2012. V. 41. № 22. P. 7464.
10. Kim Y., Yun J.G., Park S.H. et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2012. V. 59. № 1. P. 35.
11. Khvalkovskiy A.V., Apalkov D., Watts S. et al. // J. Phys. D. 2013. V. 46. № 13. P. 074001.
12. Rizzo N.D., Houssameddine D., Janesky J. et al. // IEEE Trans. Magn. 2013. V. 49. № 7. P. 4441.
13. Bhatti S., Shiao R., Hirohata A. et al. // Mater. Today. 2017. V. 20. № 9. P. 530.
14. Sanvito S. // Chem. Soc. Rev. 2011. V. 40. № 6. P. 3336.
15. Naber W.J.M., Faez S., van der Wiel W.G. // J. Phys. D. 2007. V. 40. № 12. P. 205.
16. Devkota J., Geng R., Subedi R.C., Nguyen T.D. // Adv. Funct. Mater. 2016. V. 26. № 22. P. 3881.
17. Real J.A., Gaspar A.B., Carmen Muñoz M. // Dalton Trans. 2005. № 12. P. 2062.
18. Prieto-Ruiz J.P., Miralles S.G., Prima-García H. et al. // Adv. Mater. 2019. V. 31. № 10. P. 1806817.
19. Coronado E. // Nat. Rev. Mater. 2020. V. 5. № 2. P. 87.
20. Dediu V., Murgia, M., Maticotta F.C. et al. // Solid State Commun. 2002. V. 122. № 3–4. P. 181.
21. Xiong Z.H., Wu D., Vally Vardeny Z., Shi J. // Nature. 2004. V. 427. № 6977. P. 821.
22. Bogani L., Wernsdorfer W. // Nanosci. Technol. 2009. P. 194.
23. Cinchetti M., Dediu V.A., Hueso L.E. // Nat. Mater. 2017. V. 16. № 5. P. 507.
24. Forment-Aliaga A., Coronado E. // Chem. Rec. 2018. V. 18. № 7. P. 737.
25. Delprat S., Galbiati M., Tatay S. et al. // J. Phys. D. 2018. V. 51. № 47.
26. Bayliss S.L., Laorenza D.W., Mintun P.J. et al. // Science. 2020. V. 370. № 6522. P. 1309.
27. Sanvito S. // Nature Phys. 2010. V. 6. № 8. P. 562.
28. Galb M., Tatay S., Barraud C. et al. // MRS Bull. 2014. V. 39. № 7. P. 602.
29. Bergenti I., Dediu V. // Nano Mater. Sci. 2019. V. 1. № 3. P. 149.
30. Yamada R., Noguchi M., Tada H. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. № 5. P. 053110.
31. Lefter C., Davesne V., Salmon L. et al. // Magnetochemistry. 2016. V. 2. № 1. P. 18.
32. Senthil Kumar K., Ruben M. // Coord. Chem. Rev. 2017. V. 346. P. 176.
33. Christou G., Gatteschi D., Hendrickson D.N. et al. // MRS Bull. 2000. V. 25. № 11. P. 66.
34. Candini A., Klyatskaya S., Ruben M. et al. // Nano Lett. 2011. V. 11. № 7. P. 2634.
35. Urdampilleta M., Nguyen N.V., Cleuziou J.P. et al. // Int. J. Mol. Sci. 2011. V. 12. № 10. P. 6656.
36. Aravena D., Ruiz E. // J. Am. Chem. Soc. 2012. V. 134. № 2. P. 777.
37. Baadji N., Sanvito S. // Phys. Rev. Lett. 2012. V. 108. № 21. P. 217201.
38. Ding S., Tian Y., Hu W. // Nano Res. 2021. V. 14. № 11. P. 3653.
39. Kipgen L., Bernien M., Tuczek F., Kuch W. // Adv. Mater. 2021. V. 33. № 24. P. 2008141.
40. Wang K., Yang Q., Duan J. et al. // Adv. Mater. Interfaces. 2019. V. 6. № 19. P. 1.
41. Bedoya-Pinto A., Miralles S.G., Vélez S. et al. // Adv. Funct. Mater. 2018. V. 28. № 16. P. 1.
42. Long G.J., Grandjean F., Reger D.L. // Spin Crossover in Pyrazolylborate and Pyrazolylmethane Complexes. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. P. 91.
43. Naggert H., Bannwarth A., Chemnitz S. et al. // Dalton Trans. 2011. V. 40. № 24. P. 6364.
44. Mahfoud T., Molnár G., Cobo S. et al. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 99. № 5. P. 053307.
45. Voloshin Y.Z., Kostromina N.A., Krämer R.K. Clathrochelates: Synthesis, Structure and Properties. Elsevier Lt., 2002.
46. Novikov V.V., Ananyev I.V., Pavlov A.A. et al. // J. Phys. Chem. Lett. 2014. V. 5. № 3. P. 496.
47. Novikov V.V., Pavlov A.A., Nelyubina Y.V. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2015. V. 137. № 31. P. 9792.
48. Nehrkorn J., Veber S.L., Zhukas L.A. et al. // Inorg. Chem. 2018. V. 57. № 24. P. 15330.
49. Aleshin D.Y., Pavlov A.A., Belova S.A. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2019. V. 64. № 12. P. 1532.
50. Pavlov A.A., Nelyubina Y.V., Kats S.V. et al. // J. Phys. Chem. Lett. 2016. V. 7. № 20. P. 4111.
51. Voloshin Y.Z., Belov A.S., Vologzhanina A.V. et al. // Dalton Trans. 2012. V. 41. № 20. P. 6078.
52. Voloshin Y.Z., Varzatskii O.A., Novikov V.V. et al. // Eur. J. Inorg. Chem. 2010. V. 2010. № 34. P. 5401.
53. Aisin R.R., Belov A.S., Belova S.A. et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2021. V. 47. № 1. P. 52.
54. Molnár G., Rat S., Salmon L. et al. // Adv. Mater. 2018. V. 30. № 5. P. 1703862.
55. Halcrow M.A. // Chem. Lett. 2014. V. 43. № 8. P. 1178.
56. Bousseksou A., Molnár G. // Compt. Rend. Chim. 2003. V. 6. № 8. P. 1175.