

02

Спектроскопия высокого разрешения кристаллов, содержащих ионы переходных металлов (обзор)

© М.Н. Попова

Институт спектроскопии РАН,
108840 Москва, Троицк, Россия
e-mail: popova@isan.troitsk.ru

Поступила в редакцию 03.09.2021 г.

В окончательной редакции 03.09.2021 г.

Принята к публикации 10.09.2021 г.

Дан краткий обзор работ по исследованию кристаллов, содержащих ионы металлов с незаполненной f - или d -оболочками, выполненных в Институте спектроскопии РАН методом фурье-спектроскопии высокого разрешения. Среди основных направлений исследований — сверхтонкая структура в спектрах, изотопические эффекты, роль случайных деформаций, спектроскопия фазовых переходов, низкоразмерные магнетики, связанные электрон-фононные возбуждения.

Ключевые слова: фурье-спектроскопия высокого разрешения, кристаллы с f - и d -ионами, сверхтонкая структура, изотопические эффекты, фазовые переходы.

DOI: 10.21883/OS.2022.01.51882.43-21

Введение

В обзоре приведены основные результаты по исследованию кристаллов, содержащих ионы металлов с незаполненной f - или d -оболочками, полученные в Институте спектроскопии РАН (ИСАН) методом фурье-спектроскопии высокого разрешения. Этот метод развивался в ИСАН с самого основания Института в 1968 г., по инициативе первого директора ИСАН Сергея Леонидовича Мандельштама. Во взаимодействии с Центральным конструкторским бюро уникального приборостроения (ЦКБУП) АН СССР были сконструированы и установлены в ИСАН уникальные фурье-спектрометры высокого разрешения УФС-01 и УФС-02. В этой работе принимали участие сотрудники ИСАН и ЦКБУП Г.Н. Жижин, Е.А. Виноградов, А.А. Балашов, В.С. Букреев, Н.Г. Культепин, В.А. Вагин, И.Н. Нестерук, Е.Б. Перминов. Инфракрасный вакуумный фурье-спектрометр УФС-02 работал в области от 50 до $0.8 \mu\text{m}$ с разрешением до 0.005 cm^{-1} . Такого класса спектрометры в то время были только во Франции, где на них велись исследования атомных и молекулярных спектров. В ИСАН было решено впервые в мире применить фурье-спектроскопию высокого разрешения для исследования конденсированных сред. В 1985 г. были продемонстрированы спектры, которые не удалось бы получить никаким другим методом, а именно спектры кристалла LiYF_4 :Ho с разрешенной сверхтонкой структурой [1]. С тех пор в ИСАН систематически ведутся исследования различных кристаллов методом фурье-спектроскопии высокого разрешения. В настоящее время в ИСАН функционирует уникальная научная установка „Мультифункциональная широкодиапазонная спектроскопия высокого разрешения“ (УНУ МШСВР ИСАН) [2]), основу которой составляет

фурье-спектрометр высокого разрешения Bruker 125HR. К.Н. Болдырев, С.А. Климин и другие сотрудники Лаборатории фурье-спектроскопии ИСАН существенно расширили возможности коммерческого прибора. На УНУ можно регистрировать спектры пропускания, отражения, люминесценции, диффузного пропускания и отражения, НПВО (в том числе в поляризованном свете, в магнитных полях) в диапазоне $15\text{--}30\,000 \text{ cm}^{-1}$ (от терагерц до ультрафиолета) с разрешением до 0.001 cm^{-1} во всей спектральной области. Диапазон температур: от $\sim 1.6 \text{ K}$ (гелий с откачкой) до $\sim 450 \text{ K}$ (нагревательная приставка).

Исследования в Лаборатории фурье-спектроскопии ИСАН ведутся в сотрудничестве с теоретиками (в основном это группа Б.З. Малкина в Казанском федеральном университете) и многими российскими и зарубежными научными учреждениями. Можно выделить несколько основных направлений исследований. Это сверхтонкая структура в спектрах, изотопические эффекты, роль случайных деформаций, спектроскопия фазовых переходов, низкоразмерные магнетики, связанные электрон-фононные возбуждения.

Исследования сверхтонких взаимодействий

В работах [1,3–14] была зарегистрирована и исследована сверхтонкая структура в спектрах ряда кристаллов, активированных редкоземельными (РЗ) ионами. Эти работы, казавшиеся вначале чисто академическими, оказались востребованными в связи с возникновением и интенсивным развитием в последнее десятилетие новой области науки — квантовой информатики. Разрабатываются различные устройства оптической квантовой памяти

для квантовых повторителей в линиях связи на основе квантовой криптографии, для квантовых компьютеров. Подавляющее большинство уже работающих лабораторных макетов оптической квантовой памяти создано на основе сверхтонких уровней РЗ ионов в кристаллических матрицах. Идет активный поиск новых комбинаций ион–матрица. В связи с этим актуальны исследования сверхтонкой структуры в спектрах перспективных для оптической квантовой памяти материалов.

Изотопические эффекты

В работе [15] была обнаружена тонкая структура сверхтонких компонент линий в спектрах поглощения примесных ионов гольмия в кристаллах двойных фторидов лития-иттрия, $\text{LiYF}_4:\text{Ho}$. Экспериментально было доказано, что эта структура в спектрах одноизотопного элемента гольмия обусловлена изотопическим беспорядком в подрешетке лития и что кристаллическое поле, действующее на ион Ho^{3+} , зависит от изотопического состава по литию в ближайшем окружении иона Ho^{3+} . Из-за разницы масс изотопов ^6Li и ^7Li амплитуды их колебаний отличаются, и вследствие ангармонизма нулевых колебаний это приводит к смещению положений равновесия ближайших ионов фтора. Теоретическое рассмотрение (Б.З. Малкин) показало, что именно этот механизм статической деформации решетки является доминирующим в образовании изотопической структуры по сравнению с динамическим эффектом, обусловленным электрон-фононным взаимодействием [16]. Изотопическая структура, связанная с изотопическим беспорядком в подрешетке лития в кристалле LiYF_4 , была также обнаружена и исследована в электронных спектрах других примесных ионов: эрбия [6,17] и тулия [10,11]. Развита теория была использована также для интерпретации спектров отражения кристаллов двойных фторидов лития-иттрия с различным содержанием изотопов лития, $^6\text{Li}_x\text{Li}_{1-x}\text{YF}_4$ [18]. Работа [19] содержит краткий обзор наших исследований сверхтонкой и изотопической структуры в оптических спектрах кристаллов с РЗ ионами.

Эти работы показали, что изотопический беспорядок вносит существенный вклад в неоднородное расщепление и уширение спектральных линий и стимулировали использование изотопически чистых кристаллов в современных устройствах квантовой информатики.

Неоднородное уширение и тонкая структура спектральных линий, обусловленные случайными деформациями кристаллической решетки

Вопрос неоднородного уширения спектральных линий является фундаментальным вопросом спектроскопии.

В классической работе Стоунхэма [20] были проанализированы формы неоднородно уширенных линий синглет-синглетных переходов, обусловленные различного типа дефектами. В этой и многих последующих работах использовалась одномерная функция распределения случайных деформаций в изотропном континууме. Такой подход явно не годится для описания неоднородного уширения спектральных линий переходов между уровнями, хотя бы один из которых орбитально вырожден, и в реальных анизотропных кристаллах. В спектрах высокого разрешения РЗ ионов в кристаллических полях кубической [21], тетрагональной [11,22,23] и тригональной [24] симметрии мы обнаружили спектральные линии со специфическим провалом в центре, соответствующие переходам с участием орбитально вырожденных электронных состояний. Была развита микроскопическая теория деформационного уширения и расщепления спектральных линий, включающая вывод обобщенной функции распределения компонент тензора случайных деформаций, индуцированных точечными дефектами в упруго анизотропном континууме (Б.З. Малкин с сотрудниками) [23]. Измерения эволюции формы линий (ширины провалов) с изменением концентрации РЗ ионов позволили получить оценки сил дефектов, сопоставляемых примесным ионам в активированных кристаллах [22,23]. Результаты этой серии работ продемонстрировали возможность использования спектроскопии высокого разрешения для количественной оценки качества оптических материалов и оптимизации режимов их синтеза.

Редкоземельные бораты со структурой хантита

Большой кластер работ посвящен исследованию соединений из обширного семейства функциональных боратов со структурным типом природного минерала хантита с общей химической формулой $\text{RM}_3(\text{BO}_3)_4$ ($\text{R} = \text{Y}, \text{La-Lu}$; $\text{M} = \text{Al}, \text{Ga}, \text{Fe}, \text{Cr}, \text{Sc}$). Хантиты кристаллизуются в основном в нецентросимметричной тригональной структуре (оптическая нелинейность, магнитоэлектрические свойства), содержащей цепочки MO_6 -октаэдров, соединенных изолированными друг от друга RO_6 -призмами (малое тушение люминесценции R^{3+} РЗ ионов). Это широкозонные диэлектрики. Такие особенности в совокупности с механической прочностью, хорошей теплопроводностью и химической стойкостью делают эти соединения перспективными для использования в качестве лазерных и нелинейных сред вплоть до ультрафиолета. В то время как алюмобораты широко используются в квантовой электронике, галлиевые бораты изучены мало. Мы показали, что их люминесцентные и нелинейные свойства сравнимы с таковыми для алюмоборатов [25].

Хантиты с магнитными ионами M^{3+} (Fe, Cr) обладают интересными магнитными свойствами. Мы исследовали

весь ряд РЗ ферроборатов [26–39]. На основании сведений об энергиях и симметрии штарковских уровней РЗ ионов и их расщеплениях при магнитном упорядочивании, полученных из анализа спектров высокого разрешения, найдены параметры кристаллического поля и обменных взаимодействий [26–32]. Эти параметры использованы для моделирования магнитных свойств РЗ ферроборатов [26–32], киральной структуры электрических квадрупольных моментов [31] и вычисления электрической поляризации [30]. При этом для учета квазиодномерности магнитной подсистемы железа разработана модель (Б.З. Малкин) четырехчастичного кластера из ионов железа — минимальная модель, воспроизводящая свойства цепочки [33]. Выполнены оценки эффективности различных механизмов магнитоэлектрического отклика ферроборатов. Измеренные характеристики спектров высокого разрешения, дополненные расчетами параметров кристаллических полей и штарковской структуры мультиплетов РЗ ионов, позволили определить тип магнитной структуры в магнитоупорядоченной фазе исследованных соединений, причем и в тех случаях, когда невозможно или затруднительно провести исследования магнитного рассеяния нейтронов [29,30]. Предсказан эффект киральности индуцированных полем магнитных моментов в парамагнитной фазе ферробората диспрозия [31]. Обнаружен новый эффект — появление при магнитном упорядочении новой линии в спектре поглощения, отвечающей запрещенному переходу в ферроборате празеодима [34]. Обнаружены и исследованы связанные электрон-фононные возбуждения [35–38]. Открыт и объяснен новый эффект, вызываемый резонансным электрон-фононным взаимодействием в антиферромагнитном диэлектрике, помещенном во внешнее магнитное поле, а именно образование щели в спектре электронных возбуждений [37].

Недавняя работа [39] посвящена исследованию низкотемпературных структурных и магнитных фазовых переходов в твердых растворах $\text{Eu}_{1-x}\text{La}_x\text{Fe}_3(\text{VO}_3)_4$. Показано, что температуру структурного перехода и ширину петли гистерезиса можно регулировать, изменяя x (состав), и предложена модель, объясняющая экспериментальные результаты. Продемонстрирована ситуация, когда температура структурного перехода (12 К) значительно ниже температуры магнитного упорядочения (32 К).

В отличие от ферроборатов хантиты с другим магнитным ионом, Cr^{3+} , изучены мало. Для них характерны низкотемпературные фазовые переходы и, что сильно осложняет исследования, полиморфизм с присутствием разных структурных фаз в одном кристалле [40].

Низкоразмерные и фрустрированные магнетики

Изучению низкоразмерных и фрустрированных магнетиков посвящена обширная литература: они инте-

ресны прежде всего с точки зрения физики своими необычными чисто квантовыми свойствами. Это спин-пайерлсовские переходы в цепочках полуцелочисленных спинов, холдейновская щель в спектре магнитных возбуждений цепочек целочисленных спинов, состояния спинового льда или спиновой жидкости в фрустрированных магнетиках и т.д. Мы выполнили ряд работ по исследованию кристаллов с низкоразмерными или/и фрустрированными магнитными взаимодействиями методом фурье-спектроскопии высокого разрешения.

Исследованию фазовых переходов и кроссовера от одномерного к трехмерному магнетизму в семействе цепочечных никелатов $\text{Y}_{2-x}\text{R}_x\text{BaNiO}_5$ (R — редкая земля) — квазиодномерных холдейновских магнетиков (спин ионов Ni^{2+} $S = 1$) посвящены работы [41–48]. Тогда как никелат иттрия — идеальный одномерный магнетик (в нем нет магнитного упорядочения, по крайней мере, вплоть до 0.1 К, наблюдается щель Холдейна в спектре магнитных возбуждений, характерная для цепочек целочисленных спинов), замена иттрия на редкую землю приводит к усилению межцепочечного взаимодействия и трехмерному магнитному порядку. Методом РЗ зонда были зарегистрированы магнитные фазовые переходы и определены типы магнитных структур в соединениях R_2BaNiO_5 [41–44,48]. Сравнение данных измерений с результатами расчетов в рамках развитой Б.З. Малкиным модели обменных зарядов в теории кристаллического поля позволило прийти к заключению, что тип магнитной структуры определяется одноионной магнитной анизотропией РЗ иона [45,46]. В инфракрасных спектрах цепочечного никелата гадолиния обнаружен новый тип оптических возбуждений одномерной цепочки спинов $S = 1$ — магнитное поглощение с участием фонона [47]. С привлечением результатов расчета динамики решетки рассмотрен возможный механизм формирования спин-фононных возбуждений [47].

В работах [49–57] приведены результаты спектроскопических исследований спин-пайерсовского квазиодномерного магнетика CuGeO_3 и соединения NaV_2O_5 , в котором наблюдается сложный фазовый переход, подобный спин-пайерсовскому, сопровождаемый зарядовым упорядочением. В работах [58,59] на основе спектроскопических данных для $\text{Yb}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ проанализированы параметры кристаллического поля для фрустрированных магнетиков со структурой пирохлора $\text{R}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ (R = Tb, Ho, Er, Tm, Yb). Физически обоснованные корректные параметры необходимы для интерпретации низкотемпературной магнитной структуры и спиновой динамики пирохлоров. Работы [60–62] посвящены первым результатам исследования новых магнитных соединений $\text{Ln}_3\text{CrGe}_3\text{Be}_2\text{O}_{14}$ (Ln = La, Pr, Nd) с квазиодномерными взаимодействиями в подсистеме хрома и фрустрированными — в РЗ подсистеме. Это первый пример соединений из функционального семейства лангаситов, в которых присутствуют две магнитные подсистемы.

Следует упомянуть еще одно чрезвычайно интересное магнитное соединение — метаборат меди CuB_2O_4 , имеющий тетрагональную кристаллическую структуру. Несмотря на простую формулу, структура сложная, с 12 формульными единицами в элементарной ячейке и двумя неэквивалентными позициями для ионов меди Cu^{2+} . При этом в одной из подсистем меди доминируют одномерные магнитные взаимодействия, и она остается неупорядоченной при самых низких температурах. Вторая подсистема меди упорядочивается при температуре около 20 К, ее характеризует чрезвычайно сложная фазовая Н–Т-диаграмма. В нашей работе [63] обнаружен появляющийся при магнитном упорядочении оптический линейный дихроизм в изотропной кристаллографической базовой плоскости кристалла метабората меди. Выяснена природа линейного дихроизма и показано, что он может служить чувствительным, селективным по подрешеткам методом обнаружения фазовых переходов и зондирования магнитных структур. Работа [63] также поставила точку в принципиальной дискуссии о возможности контролировать киральность кристалла с помощью магнитного поля.

Заключение

Возможности исследований конденсированных сред методом фурье-спектроскопии высокого разрешения далеко не исчерпываются затронутыми областями. Недавно в ИСАН были получены интересные результаты по физике гибридных органо-неорганических перовскитов, различных примесных центров в алмазе и кремнии, магнитоструктурных фазовых переходов в ряде соединений.

Благодарности

Я признательна своим коллегам — соавторам по публикациям за плодотворную совместную работу.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у нее нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] N.I. Agladze, M.N. Popova. *Solid State Commun.*, **55**, 1097 (1985).
- [2] <http://www.ckr-rf.ru/usu/508571>
- [3] Н.И. Агладзе, Е.А. Виноградов, М.Н. Попова. *ЖЭТФ*, **91**(4), 1210 (1986). [N.I. Agladze, E.A. Vinogradov, M.N. Popova. *Sov. Phys. JETP*, **64**(4), 716 (1986)].
- [4] Н.И. Агладзе, Е.А. Виноградов, М.Н. Попова. *Опт. и спектр.*, **61**(1), 3 (1986). [N.I. Agladze, E.A. Vinogradov, M.N. Popova. *Opt. Spectrosc. (USSR)*, **61**(1), 1 (1986)].
- [5] M.N. Popova, N.I. Agladze. *Molecular physics*, **102**, 1315 (2004). DOI: 10.1080/00268970410001728618
- [6] M.N. Popova, E.P. Chukalina, B.Z. Malkin, S.K. Saikin. *Phys. Rev. B*, **61**, 7421 (2000). DOI: 10.1103/PhysRevB.61.7421
- [7] M.N. Popova, E.P. Chukalina, B.Z. Malkin, E. Antic-Fidancev, P. Porcher, J.P. Chaminade. *Phys. Rev. B*, **63**, 075103 (2001). DOI: 10.1103/PhysRevB.63.075103
- [8] J.-P. Wells, R. Glynn, D. Jones, M.F. Reid, M.N. Popova, E.P. Chukalina. *Molecular physics*, **102**, 1367 (2004). DOI: 10.1080/00268970410001728555
- [9] D.S. Pytalev, S.A. Klimin, M.N. Popova. *Phys. Lett. A*, **372**, 2332 (2008). DOI: 10.1016/j.physleta.2007.11.053
- [10] D.S. Pytalev, S.A. Klimin, M.N. Popova. *Phys. Lett. A*, **372**, 3506 (2008). DOI: 10.1016/j.physleta.2008.01.072
- [11] S.A. Klimin, D.S. Pytalev, M.N. Popova, B.Z. Malkin, M.V. Vanyunin, S.L. Korableva. *Phys. Rev. B*, **81**, 045113 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevB.81.045113
- [12] E.P. Chukalina, D.S. Pytalev, M.N. Popova. *Physics Letters A*, **375**, 3205 (2011). DOI: 10.1016/j.physleta.2011.07.011
- [13] D.S. Pytalev, E.P. Chukalina, M.N. Popova, G.S. Shakurov, S.L. Korableva, B.Z. Malkin. *Phys. Rev. B*, **86**, 115124 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevB.86.115124
- [14] M.N. Popova. *Optical Materials*, **35**, 1842 (2013). DOI: 10.1016/j.optmat.2013.03.013
- [15] N.I. Agladze, M.N. Popova, G.N. Zhizhin, V.J. Egorov, M.A. Petrova. *Phys. Rev. Lett.*, **66**, 477 (1991). DOI: 10.1103/PhysRevLett.66.477
- [16] Н.И. Агладзе, М.А. Корейба, Б.З. Малкин, В.П. Пекуровский, М.Н. Попова. *ЖЭТФ*, **104**(6), 4171 (1993). [N.I. Agladze, M.N. Popova, M.A. Koreiba, B.Z. Malkin, V.P. Pekurovskii. *JETP*, **77**(6), 1021 (1993)]
- [17] E.P. Chukalina, M.N. Popova, S.L. Korableva, R.Yu. Abdulsabirov. *Phys. Lett. A*, **269**(5–6), 348 (2000). DOI: 10.1016/S0375-9601(00)00273-5
- [18] E.A. Vinogradov, V.A. Yakovlev, N.N. Novikova, M.N. Popova, S.K. Saikin, B.Z. Malkin. *Solid State Commun.*, **142**, 256 (2007). DOI: 10.1016/j.ssc.2007.02.03
- [19] М.Н. Попова. *Опт. и спектр.*, **119**(4), 541 (2015). DOI: 10.7868/S0030403415100256 [M.N. Popova. *Opt. Spectr.*, **119**(4), 544 (2015). DOI: 10.1134/S0030400X15100239]
- [20] A.M. Stoneham. *Rev. Mod. Phys.*, **41**, 82 (1969). DOI: 10.1103/RevModPhys.41.82
- [21] B.Z. Malkin, D.S. Pytalev, M.N. Popova, E.I. Baibekov, M.L. Falin, K.I. Gerasimov, N.M. Khaidukov. *Phys. Rev. B*, **86**, 134110 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevB.86.134110
- [22] G.S. Shakurov, E.P. Chukalina, M.N. Popova, B.Z. Malkin, A.M. Tkachuk. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **16**, 24727 (2014). DOI: 10.1039/c4cp03437f
- [23] B.Z. Malkin, N.M. Abishev, E.I. Baibekov, D.S. Pytalev, K.N. Boldyrev, M.N. Popova, M. Bettinelli. *Phys. Rev. B*, **96**, 014116 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevB.96.014116
- [24] K.N. Boldyrev, N.M. Abishev, I.E. Mumdzi, S.L. Nikitin, P.J. Deren, B.Z. Malkin, M.N. Popova. *Phys. Rev. B*, **103**, 054103 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevB.103.054103
- [25] Н.Н. Кузьмин, К.Н. Болдырев, Н.И. Леонюк, С.Ю. Стефанович, М.Н. Попова. *Опт. и спектр.*, **127**(1), 112 (2019). DOI: 10.21883/OS.2019.07.47937.101-19 [N.N. Kuz'min, K.N. Boldyrev, N.I. Leonyuk, S.Yu. Stefanovich, M.N. Popova. *Opt. Spectr.*, **127**(1), 107 (2019). DOI: 10.1134/S0030400X19070154].

- [26] M.N. Popova, E.P. Chukalina, T.N. Stanislavchuk, E.A. Popova, B.Z. Malkin, A.R. Zakirov, E. Antic-Fidancev, L.N. Bezmaternykh, V.L. Temerov. *Phys. Rev. B*, **75**, 224435 (2007). DOI: 10.1103/PhysRevB.75.224435
- [27] M.N. Popova, T.N. Stanislavchuk, B.Z. Malkin, L.N. Bezmaternykh. *Phys. Rev. B*, **80**, 195101 (2009). DOI: 10.1103/PhysRevB.80.195101
- [28] T.N. Stanislavchuk, M.N. Popova, B.Z. Malkin, L.N. Bezmaternykh. *J. Phys.: Condens. Matter*, **24**, 196002 (2012). DOI: 10.1088/0953-8984/24/19/196002
- [29] М.Н. Попова, Е.П. Чукалина, Б.З. Малкин, Д.А. Ерофеев, Л.Н. Безматерных, И.А. Гудим. *ЖЭТФ*, **145** (1), 128 (2014). DOI: 10.7868/S0044451014010131 [M.N. Popova, E.P. Chukalina, B.Z. Malkin, D.A. Erofeev, L.N. Bezmaternykh, I.A. Gudim. *JETP*, **118** (1), 111 (2014). DOI: 10.1134/S1063776114010142]
- [30] M.N. Popova, B.Z. Malkin, K.N. Boldyrev, T.N. Stanislavchuk, D.A. Erofeev, V.L. Temerov, I.A. Gudim. *Phys. Rev. B*, **94**, 184418 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevB.94.184418
- [31] M.N. Popova, E.P. Chukalina, K.N. Boldyrev, T.N. Stanislavchuk, B.Z. Malkin, I.A. Gudim. *Phys. Rev. B*, **95**, 125131 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevB.95.125131
- [32] M.N. Popova, E.P. Chukalina, D.A. Erofeev, I.A. Gudim, I.V. Golosovsky, A. Gukasov, A.A. Mukhin, B.Z. Malkin. *Phys. Rev. B*, **103**, 094411 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevB.103.094411
- [33] B.Z. Malkin, E.A. Popova, E.P. Chukalina, A. Jablunovskis, M.N. Popova. *Physica Status Solidi—Rapid Research Letters*, **14**, 1900603 (2020). DOI: 10.1002/pssr.201900603
- [34] M.N. Popova, T.N. Stanislavchuk, B.Z. Malkin, L.N. Bezmaternykh. *Phys. Rev. Lett.*, **102**, 187403 (2009). DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.187403
- [35] K.N. Boldyrev, T.N. Stanislavchuk, A.A. Sirenko, L.N. Bezmaternykh, M.N. Popova. *Phys. Rev. B*, **90**, 121101(R) (2014). DOI: 10.1103/PhysRevB.90.121101
- [36] S.A. Klimin, A.B. Kuzmenko, M.A. Kashchenko, M.N. Popova. *Phys. Rev. B*, **93**, 054304 (2016). DOI: 10.1103/PhysRevB.93.054304
- [37] K.N. Boldyrev, T.N. Stanislavchuk, A.A. Sirenko, D. Kamenskiy, L.N. Bezmaternykh, M.N. Popova. *Phys. Rev. Lett.*, **118**, 167203 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.167203
- [38] М.Н. Попова, К.Н. Болдырев. *УФН*, **189** (3), 292 (2019). DOI: 10.3367/UFNr.2018.06.038413 [M.N. Popova, K.N. Boldyrev. *Physics-USpekhi*, **62** (3), 275 (2019). DOI: 10.3367/UFNe.2018.06.038413]
- [39] K.N. Boldyrev, V.M. Burlakov, I.A. Gudim, S.Yu. Gavrillkin, M.N. Popova. *Phys. Rev. Materials*, **5**, 094414 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.5.094414
- [40] K.N. Boldyrev, N.N. Kuz'min, A.A. Mukhin, V.Yu. Ivanov, E.A. Dobretsova, E.A. Popova, S.Yu. Gavrillkin, N.I. Leonyuk, V.V. Maltsev, B.Z. Malkin, M.N. Popova. *Phys. Rev. Materials*, accepted (2021).
- [41] G.G. Chpurko, Z.A. Kazei, D.A. Kudrjartsev, R.Z. Levitin, B.V. Mill, M.N. Popova, V.V. Snegirev. *Phys. Lett. A*, **157** (1), 81 (1991). DOI: 10.1016/0375-9601(91)90413-3
- [42] Yu.A. Hadjiiskii, I.V. Paukov, M.N. Popova, B.V. Mill. *Phys. Lett. A*, **189** (1–2), 109 (1994). DOI: 10.1016/0375-9601(94)90827-3
- [43] M.N. Popova, Yu.A. Hadjiiskii, I.V. Paukov, B.V. Mill. *Phys. Lett. A*, **203** (5–6), 412 (1995). DOI: 10.1016/0375-9601(95)00391-F
- [44] S.A. Klimin, A.S. Galkin, M.N. Popova. *Phys. Lett. A*, **376** (23), 1861 (2012). DOI: 10.1016/j.physleta.2012.03.013
- [45] M.N. Popova, S.A. Klimin, E.P. Chukalina, B.Z. Malkin, R.Z. Levitin, B.V. Mill, E. Antic-Fidancev. *Phys. Rev. B*, **68**, 155103 (2003). DOI: 10.1103/PhysRevB.68.155103
- [46] M.N. Popova, S.A. Klimin, E.P. Chukalina, E.A. Romanov, B.Z. Malkin, E. Antic-Fidancev, B.V. Mill, G. Dhalenne. *Phys. Rev. B*, **70**, 024414 (2005). DOI: 10.1103/PhysRevB.70.024414
- [47] S.A. Klimin, A.B. Kuzmenko, M.N. Popova, B.Z. Malkin, I.V. Telegina. *Phys. Rev. B*, **82**, 174425 (2010). DOI: 10.1103/PhysRevB.82.174425
- [48] S.A. Klimin, A.S. Galkin, M.N. Popova. *J. Alloys Compd.*, **625**, 193 (2015). DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.11.129
- [49] M.N. Popova, A.B. Sushkov, S.A. Golubchik, A.N. Vasil'ev, L.I. Leonyuk. *Phys. Rev. B*, **57**, 5040 (1998). DOI: 10.1103/PhysRevB.57.5040
- [50] М.Н. Попова, А.Б. Сушков, А.Н. Васильев, М. Иsobэ, Ю. Уэда. Письма в *ЖЭТФ*, **65** (9), 711 (1997). [M.N. Popova, A.B. Sushkov, A.N. Vasil'ev, M. Isobe, Yu. Ueda. *JETP Lett.*, **65** (9), 743 (1997). DOI: 10.1134/1.567420].
- [51] S.A. Golubchik, M. Isobe, A.N. Ivlev, B.N. Mavrin, M.N. Popova, A.B. Sushkov, Yu. Ueda, A.N. Vasil'ev. *J. Phys. Soc. Japan*, **66** (12), 4042 (1997).
- [52] A.I. Smirnov, M.N. Popova, A.B. Sushkov, S.A. Golubchik, D.I. Khomskii, M.V. Mostovoy, A.N. Vasil'ev, M. Isobe, Y. Ueda. *Phys. Rev. B*, **59**, 14546 (1999). DOI: 10.1103/PhysRevB.59.14546
- [53] M.N. Popova, A.B. Sushkov, S.A. Golubchik, B.N. Mavrin, V.N. Denisov, B.Z. Malkin, A.I. Iskhakova, M. Isobe, Y. Ueda. *ЖЭТФ*, **115**, 2170 (1999). [M.N. Popova, A.B. Sushkov, S.A. Golubchik, B.N. Mavrin, V.N. Denisov, B.Z. Malkin, A.I. Iskhakova, M. Isobe, Y. Ueda. *JETP*, **88** (6), 1186 (1999). DOI: 10.1134/1.558909].
- [54] М.Н. Попова. *УФН*, **169** (3), 353 (1999). DOI: 10.3367/UFNr.0169.199903n.0353 [M.N. Popova, *Physics-USpekhi*, **42** (3), 288 (1999). DOI: 10.1070/PU1999v042n03ABEH000532].
- [55] M.N. Popova, A.B. Sushkov, S.A. Golubchik, M. Isobe, Y. Ueda. *Physica B*, **284–288**, Part 2, 1617 (2000). DOI: 10.1016/S0921-4526(99)02723-4
- [56] M.N. Popova, A.B. Sushkov, S.A. Klimin, E.P. Chukalina, B.Z. Malkin, M. Isobe, Yu. Ueda. *Phys. Rev. B*, **65**, 144303 (2002). DOI: 10.1103/PhysRevB.65.144303
- [57] М.Н. Попова, А.Б. Сушков, Е.П. Чукалина, Е.А. Романов, М. Иsobэ, Ю. Уэда, *ФТТ*, **44** (8), 1390 (2002). [M.N. Popova, A.B. Sushkov, E.P. Chukalina, E.A. Romanov, M. Isobe, Y. Ueda. *Phys. Solid State* **44** (8), 1450 (2002). DOI: 10.1134/1.1501335].
- [58] B.Z. Malkin, A.R. Zakirov, M.N. Popova, S.A. Klimin, E.P. Chukalina, E. Antic-Fidancev, Ph. Goldner, P. Aschehoug, G. Dhalenne. *Phys. Rev. B*, **70**, 075112 (2004). DOI: 10.1103/PhysRevB.70.075112
- [59] С.А. Климин, М.Н. Попова, Е.П. Чукалина, Б.З. Малкин, А.Р. Закиров, Е. Антик-Фиданцев, Ф. Голднер, П. Асчеhouг, Г. Дхаленне. *ФТТ*, **47** (8), 1376 (2005). [S.A. Klimin, M.N. Popova, E.P. Chukalina, B.Z. Malkin, A.R. Zakirov, E. Antic-Fidancev, Ph. Goldner, P. Aschehoug, G. Dhalenne. *Phys. Solid State*, **47** (8), 1425 (2005). DOI: 10.1134/1.2014481]

- [60] M.M. Markina, B.V. Mill, G. Pristáš, M. Marcin, S.A. Klimin, K.N. Boldyrev, M.N. Popova. *J. Alloys Compd.*, **779**, 380 (2019). DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.11.227
- [61] S.A. Klimin, B.V. Mill, M.N. Popova. *J. Rare Earths*, **37**, 1250 (2019). DOI: 10.1016/j.jre.2018.12.011
- [62] N. Kuzmin, S. Klimin, B. Mavrin, V. Chernyshev, B. Mill, M. Popova. *J. Phys. Chem. Solids*, **138**, 109266 (2020). DOI: 10.1016/j.jpcs.2019.109266
- [63] K.N. Boldyrev, R.V. Pisarev, L.N. Bezmaternykh, M.N. Popova, *Phys. Rev. Lett.*, **114**, 247210 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.247210