

Перестраиваемая высокочастотная ЭПР-спектроскопия кристаллов LiYF_4 и LiLuF_4 , активированных редкоземельными ионами

© Г.С. Шакуров, Б.З. Малкин*, М.В. Ванюнин*, С.Л. Кораблева*

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского Российской академии наук,
420029 Казань, Россия

* Казанский государственный университет,
420008 Казань, Россия

E-mail: shakurov@kfti.knc.ru

Измерены спектры ЭПР изоструктурных кристаллов LiYF_4 и LiLuF_4 , активированных ионами Dy^{3+} , Er^{3+} и Ho^{3+} , при температуре 4.2 К в области частот 40–800 GHz. Обнаружены и исследованы эффекты, обусловленные изотопическим беспорядком в литиевых подрешетках, случайным кристаллическим полем и взаимодействием между примесными парамагнитными ионами. Результаты измерений использованы для определения спектральных характеристик исследованных соединений и параметров кристаллического поля. Показано, что доминирующую роль в формировании изотопической структуры сигналов ЭПР играют индуцированные дефектами массы локальные деформации кристаллической решетки.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ (проект РНП 2.1.1.7348) и грантом ВНШ.-6213.2006.2.

PACS: 71.70.Ej, 75.10.Dg, 76.30.Kg

1. Введение

Спектральные и магнитные свойства активированных редкоземельными (РЗ) ионами кристаллов двойных фторидов лития–иттрия и лития–лютеция интенсивно исследуются уже в течение нескольких десятилетий. Эти кристаллы являются модельными системами в теоретической спектроскопии и широко используются как эффективные лазерные материалы. Использование субмиллиметровой техники электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) дает возможность изучать квантовые переходы между подуровнями основных мультиплетов РЗ-ионов, расщепленных в кристаллическом поле (КП). Из анализа полевых зависимостей частот резонансных переходов, структуры и ширины спектральных линий можно получить информацию о параметрах КП, пространственной структуре парамагнитного центра и взаимодействиях между парамагнитными ионами.

Кристаллы LiYF_4 и LiLuF_4 имеют тетрагональную структуру (пространственная группа $I4_1/a$), примесные РЗ-ионы замещают ионы Y^{3+} и (Lu^{3+}) в узлах с локальной симметрией S_4 . Мультиплеты незаполненной электронной $4f^n$ -оболочки некрамерсовых РЗ-ионов с четным n расщепляются в КП на синглеты (отвечающие неприводимым представлениям Γ_1 и Γ_2 точечной группы S_4) и дублеты Γ_{34} ; спектр крамерсовых ионов состоит из дублетов Γ_{56} и Γ_{78} . Внешнее постоянное магнитное поле \mathbf{B} смещает штарковские подуровни мультиплетов и расщепляет дублеты. Переменное магнитное поле $\mathbf{B}_1(t)$ частоты ω может индуцировать резонансные переходы как между подуровнями одного дублета, так и между подуровнями различных дублетов, а также переходы дублет–синглет и синглет–синглет. Ранее высокочастотные спектры ЭПР были измерены в концентрированных РЗ-кристаллах LiRF_4 ($R = \text{Tb}, \text{Er}, \text{Ho}$) [1] и в раз-

бавленном парамагнетике $\text{LiYF}_4:\text{Ho}^{3+}$ [2,3]. В работе [3] нами была обнаружена тонкая структура сигналов ЭПР, обусловленная изотопическим беспорядком в литиевых подрешетках, идентифицированы линии парных центров, определены характеристики случайного КП низкой симметрии. В настоящей работе приводятся результаты дополнительного экспериментального и теоретического исследования спектров ЭПР монокристаллов LiYF_4 и LiLuF_4 с различными концентрациями примесных РЗ-ионов в расширенной области частот.

2. Результаты измерений

Измерения были выполнены на ЭПР-спектрометре с использованием ламп обратной волны в качестве генераторов в диапазоне частот 40–800 GHz при температуре 4.2 К в постоянном магнитном поле с напряженностью до 1 Т (детальное описание спектрометра приведено в работе [4]). Исследованы монокристаллы $\text{LiYF}_4:\text{Ho}$ (0.1%, 1%), $\text{LiLuF}_4:\text{Ho}$ (0.1%, 1%, 2%, 3%), $\text{LiYF}_4:\text{Er}$ (0.025%) и $\text{LiYF}_4:\text{Dy}$ (0.05%, 0.02%, 0.005%) с естественным содержанием изотопов лития ^6Li (7.4%) и ^7Li (92.6%), выращенные по методу Бриджмена–Стокбаргера, и изотопически обогащенные образцы $^7\text{LiYF}_4:\text{Ho}$ (0.1%) и $^7\text{Li}_{0.1}^6\text{Li}_{0.9}\text{YF}_4:\text{Ho}^{3+}$ (0.1%), изученные ранее методами оптической спектроскопии [5].

В спектрах ЭПР кристаллов $\text{LiYF}_4:\text{Dy}^{3+}$ и $\text{LiYF}_4:\text{Er}^{3+}$ наблюдались сигналы, отвечающие как переходам между подуровнями основного дублета ($\Gamma_{56}-\text{Dy}^{3+}$, $\Gamma_{78}-\text{Er}^{3+}$), так и между подуровнями основного и первого возбужденного дублетов. Эксперименты выполнены в скрещенных ($\mathbf{B}_1 \perp \mathbf{B}$) и коллинеарных ($\mathbf{B}_1 \parallel \mathbf{B}$) полях; интенсивности спектральных

линий на переходах дублет—дублет существенно зависят от взаимной ориентации постоянного и переменного полей. Сигналы, соответствующие резонансу в основном дублете, содержат интенсивную центральную линию

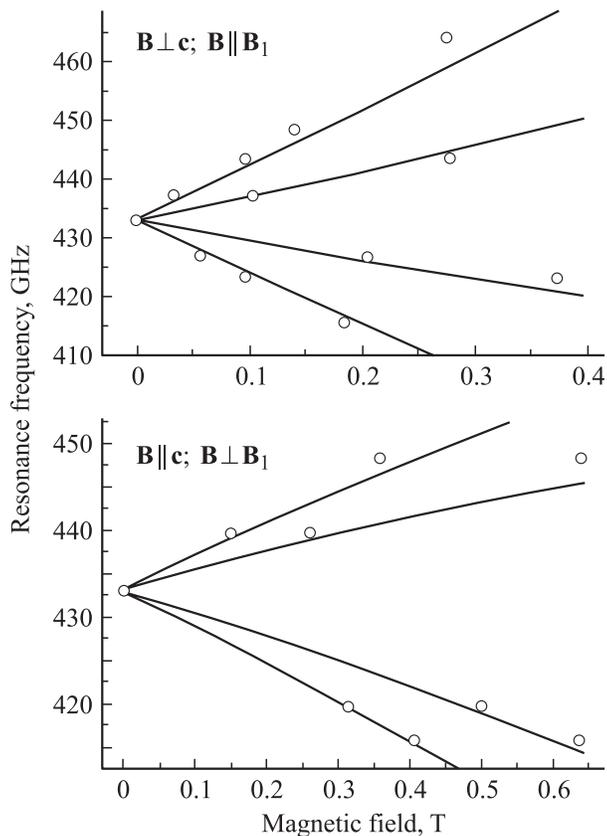


Рис. 1. Частоты переходов между зеемановскими подуровнями основного и первого возбужденного дублетов ионов Dy^{3+} в кристалле $LiYF_4$. Точки — данные измерений, сплошные линии — результаты вычислений с параметрами КП, приведенные в таблице.

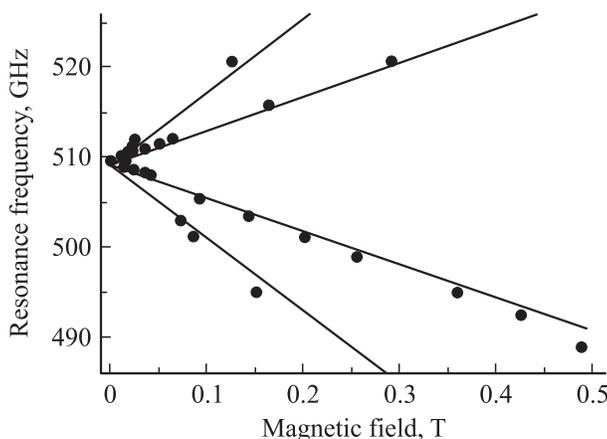


Рис. 2. Резонансные частоты переходов между подуровнями двух нижних дублетов ионов Er^{3+} в кристалле $LiYF_4$ в зависимости от магнитного поля $B \parallel c$. Точки — данные измерений, сплошные линии — результаты вычислений.

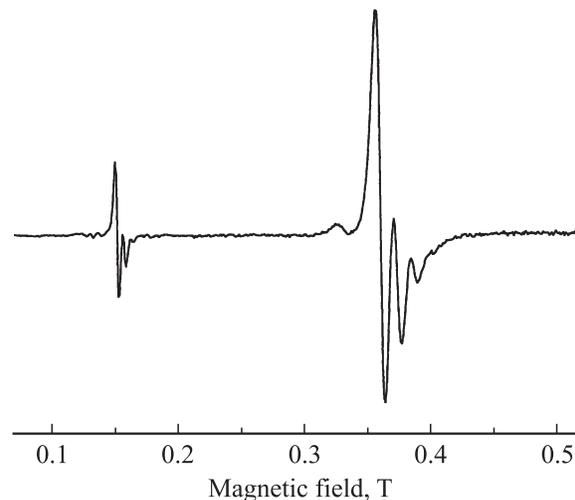


Рис. 3. Изотопическая структура линий ЭПР в кристалле $LiYF_4:Er^{3+}$ (0.025%) на частоте 495 GHz (переходы дублет—дублет) в магнитном поле $B \parallel c$.

четных изотопов и разрешенную сверхтонкую структуру нечетных изотопов ^{161}Dy (18.9%) и ^{163}Dy (25%) с ядерным спином $I = 5/2$, ^{167}Er (24.4%) с ядерным спином $I = 7/2$. Сверхтонкая структура линии ЭПР наблюдается и на переходах дублет—дублет в ионах Dy^{3+} . Зависимости частот сигналов от величины и ориентации постоянного магнитного поля (рис. 1, 2) удовлетворительно согласуются с измеренными ранее величинами g -факторов основных и первых возбужденных дублетов ионов Er^{3+} и Dy^{3+} [6,7]. Энергии возбужденных дублетов (Γ_{78} , 433.2 ± 1 GHz и Γ_{56} , 510 ± 1 GHz, в спектрах Dy^{3+} и Er^{3+} соответственно) определены непосредственно по частоте сигналов ЭПР в нулевом магнитном поле и согласуются с данными оптических исследований [8]. Следует заметить, что частоты переходов дублет—дублет изменяются при вращении постоянного магнитного поля вокруг оси симметрии кристаллической решетки.

На переходах дублет—дублет в спектрах кристалла $LiYF_4:Er^{3+}$ впервые наблюдалась тонкая структура линий ЭПР с интервалами 500 ± 50 MHz (рис. 3), подобная наблюдавшейся ранее структуре оптических спектральных линий [9]. Эта структура, обусловленная изотопическим беспорядком в литиевых подрешетках, детально обсуждается далее.

Форма сигналов ЭПР кристаллов $LiYF_4:Ho^{3+}$ и $LiLuF_4:Ho^{3+}$ существенно отличается от спектров эрбия и диспрозия, в которых доминируют линии четных изотопов, поскольку имеется только один изотоп ^{165}Ho с ядерным спином $I = 7/2$ и с наибольшей среди РЗ-элементов константой магнитного сверхтонкого взаимодействия в основном мультиплете 5I_8 . Магнитная сверхтонкая структура наблюдалась во всех зарегистрированных сигналах ЭПР, отвечающих четырем типам переходов: между зеемановскими подуровнями основно-

го дублета, между подуровнями основного дублета и первых двух возбужденных синглетов, а также между подуровнями этих синглетов. Наиболее простой вид (восемь почти эквидистантных линий) сверхтонкая структура имеет при ориентации постоянного магнитного поля вдоль оси симметрии решетки c . Если $\mathbf{B} \parallel \mathbf{c}$, переходы дублет–синглет разрешены в скрещенных постоянном и переменном полях, переходы синглет–синглет разрешены в коллинеарных полях. Измеренные полевые зависимости частот разрешенных переходов синглет–синглет и дублет–второй синглет в кристалле $\text{LiYF}_4:\text{Ho}^{3+}$ представлены на рис. 4. Верхние восемь и нижние восемь ветвей в спектре частот на рис. 4, b отвечают соответственно переходам с нижних и верхних сверхтонких подуровней основного дублета с $g_{\parallel} = 13.3$ и $g_{\perp} = 0$. В нулевом магнитном поле энергии возбуждения синглетов равны 6.85 и 23.2 cm^{-1} (эти величины совпадают с данными, полученными методами оптической спектроскопии высокого разрешения [10]). В кристалле $\text{LiLuF}_4:\text{Ho}^{3+}$ соответствующие энергии равны 5.92 и 26 cm^{-1} и $g_{\parallel} = 12.7$ (ранее энергия возбуждения первого синглета была определена в работе [11]).

Вследствие смешивания волновых функций основного дублета с волновыми функциями синглетов магнитным

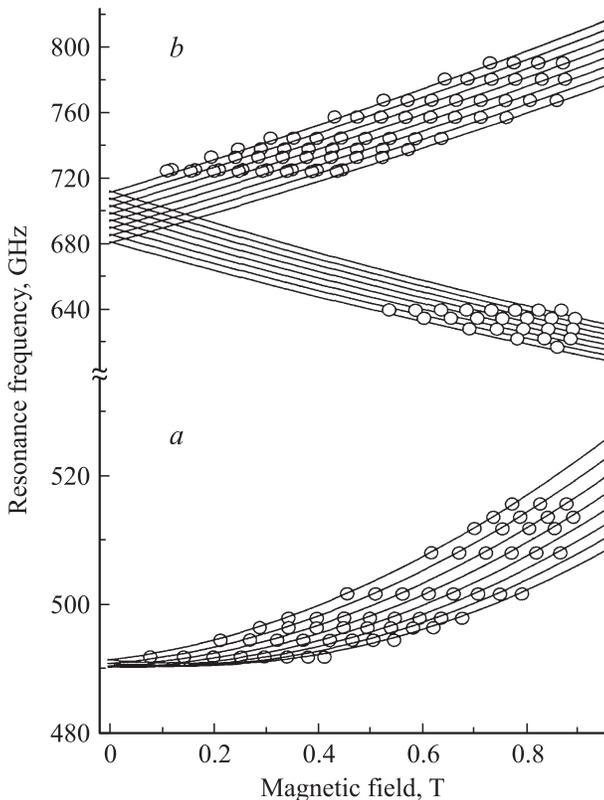


Рис. 4. Частоты резонансных переходов между сверхтонкими подуровнями синглетов G_2^1 и G_2^2 (a), основного дублета G_{34} и синглета G_2^2 (b) в зависимости от постоянного магнитного поля, параллельного оси c , в кристалле $\text{LiYF}_4:\text{Ho}$. Точки — данные измерений, сплошные линии соответствуют вычисленным частотам переходов.

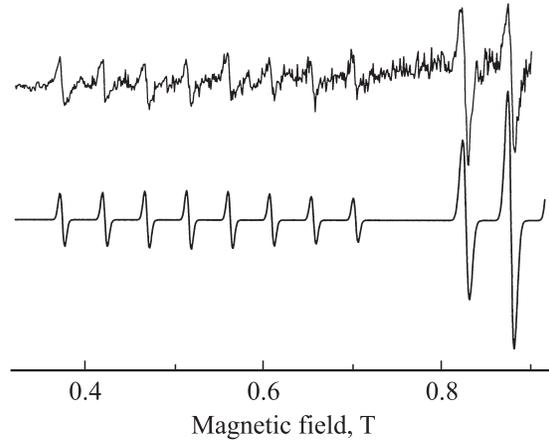


Рис. 5. Спектр ЭПР кристалла $\text{LiYF}_4:\text{Ho}^{3+}(1\%)$ и вычисленная производная спектра поглощения на частоте 100 GHz при температуре 4.2 K в коллинеарных постоянном и переменном магнитных полях ($\mathbf{B} \parallel \mathbf{B}_1 \parallel \mathbf{c}$).

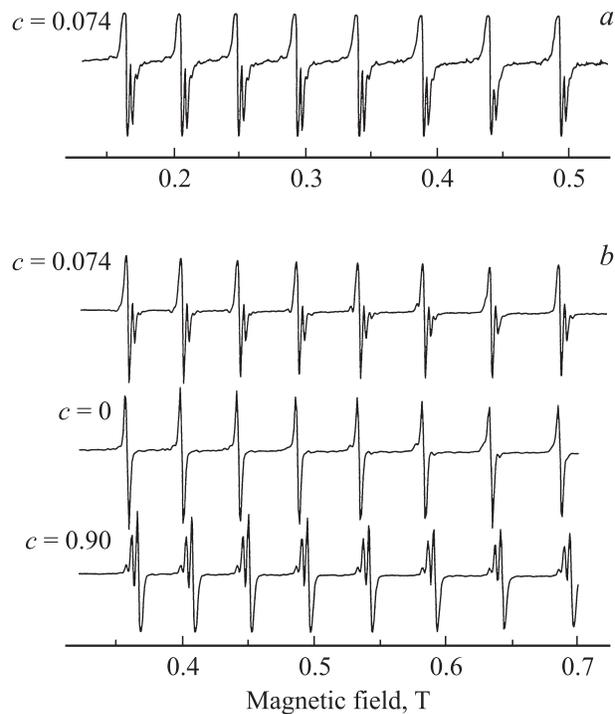


Рис. 6. Изотопическая структура сверхтонких компонент линий ЭПР примесных ионов Ho^{3+} (концентрация 0.1%) в кристаллах ${}^7\text{Li}_{1-c}{}^6\text{Li}_c\text{LuF}_4$ на частоте 205 GHz (a) и ${}^7\text{Li}_{1-c}{}^6\text{Li}_c\text{YF}_4$ на частоте 250 GHz (b) в магнитном поле $\mathbf{B} \parallel \mathbf{c}$.

сверхтонким взаимодействием и сверхтонких подуровней дублета случайным КП низкой симметрии [12] соответствующие сигналы ЭПР (переходы дублет–первый синглет и переходы между подуровнями дублета с одинаковыми проекциями ядерного спина на ось c) наблюдаются в коллинеарных полях $\mathbf{B} \parallel \mathbf{B}_1 \parallel \mathbf{c}$. Интенсивности запрещенных переходов имеют сравнимую величину в

кристаллах с достаточно большой концентрацией примесных центров, возмущающих кристаллическую решетку. В частности, соответствующие сигналы ЭПР в кристалле $\text{LiYF}_4:\text{Ho}^{3+}$ (1%) при фиксированной частоте и мощности генератора представлены на рис. 5. Моделирование спектра дало возможность оценить характеристики случайного поля в этом кристалле (см. далее).

Сигналы ЭПР в кристаллах $\text{LiYF}_4:\text{Ho}$ и $\text{LiLuF}_4:\text{Ho}$ с естественным содержанием изотопов лития и малой концентрацией (0.1%) ионов Ho^{3+} имеют разрешенную тонкую структуру с интервалами между соседними компонентами 300 ± 50 MHz (переходы дублет–первый синглет, синглет–синглет). Измерения спектров ЭПР в кристаллах, обогащенных по ^7Li (тонкая структура не наблюдается) и по ^6Li (см. рис. 6, в соответствии с изменением знака дефекта массы изменяется и знак смещений компонент структуры), однозначно указывают на связь этой структуры с изотопическим беспорядком в литиевых подрешетках. Относительные интегральные интенсивности компонент изотопической структуры качественно согласуются с биномиальным распределением вероятностей заполнения ближайших к РЗ-иону позиций ионов лития изотопами ^6Li и ^7Li [13].

Помимо сигналов от изолированных ионов гольмия в спектрах ЭПР присутствуют слабые линии-спутники (рис. 7), отвечающие парным центрам (интенсивность этих линий по отношению к интенсивности основного сигнала увеличивается пропорционально концентрации парамагнитных ионов). Смещения линий димеров $(\text{Ho}^{3+})_2$ относительно линий изолированных ионов в LiLuF_4 существенно больше, чем в LiYF_4 , вследствие изменения КП в парных центрах, обусловленного существенной локальной деформацией решетки при замещении ионов Lu^{3+} ионами Ho^{3+} .

3. Обсуждение результатов

Измеренные полевые зависимости частот и интенсивностей резонансных переходов были использованы для определения параметров КП в кристаллах LiYF_4 и LiLuF_4 , активированных РЗ-ионами. При моделировании спектра поглощения в магнитных полях \mathbf{B} и $\mathbf{B}_1(t)$ использовался гамильтониан РЗ-иона

$$H = H_{cf} + g_J \mu_B \mathbf{B} \mathbf{J} + A \mathbf{J} \mathbf{I} + H_{rcf}, \quad (1)$$

определенный в пространстве $(2J+1)(2I+1)$ электронно-ядерных состояний основного мультиплетта с полным моментом J . Первое слагаемое в правой части (1)

$$H_{cf} = \alpha B_2^0 O_2^0 + \beta (B_4^0 O_4^0 + B_4^4 O_4^4 + B_4^{-4} O_4^4) + \gamma (B_6^0 O_6^0 + B_6^4 O_6^4 + B_6^{-4} O_6^4) \quad (2)$$

— оператор энергии иона в КП в кристаллографической системе координат (O_p^k, Ω_p^k -операторы Стивенса, $\alpha, \beta,$

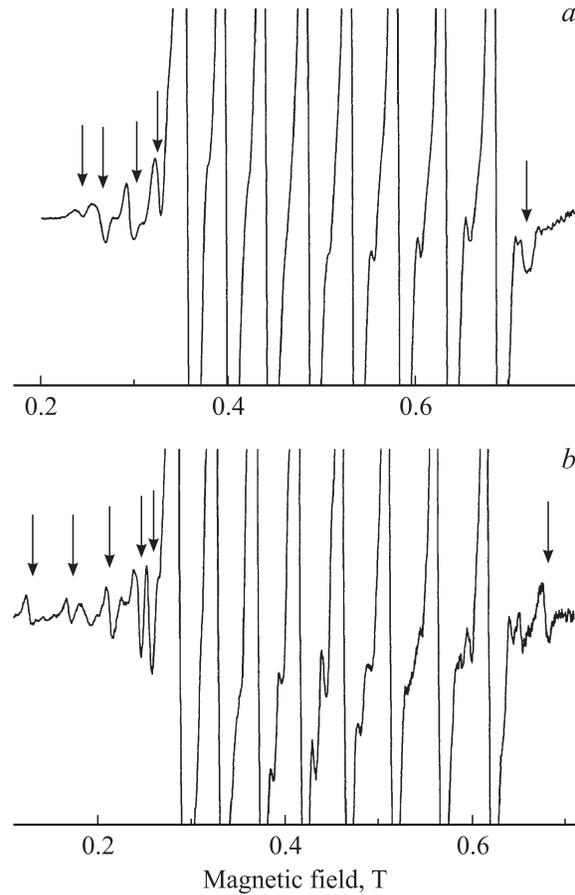


Рис. 7. Сигналы ЭПР парных центров (указаны стрелками) примесных ионов Ho^{3+} (1%) в кристаллах LiYF_4 (a) и LiLuF_4 (b) на частотах 250 и 215 GHz соответственно в магнитном поле $\mathbf{B} \parallel c$.

γ — соответствующие приведенные матричные элементы). Второе слагаемое — электронная зеемановская энергия (μ_B — магнетон Бора, g_J — фактор Ланде). Третье слагаемое — энергия магнитного сверхтонкого взаимодействия. Взаимодействие со случайным КП, которое проявляется в основном в спектральных характеристиках некрамерсовых ионов, в частности Ho^{3+} , мы определили, следуя работе [3], параметрами B_2^2 и B_2^{-2}

$$H_{rcf} = \alpha (B_2^2 O_2^2 + B_2^{-2} O_2^2). \quad (3)$$

Приведенные в таблице параметры КП получены из сопоставления результатов численной диагонализации оператора (1) с измеренными полевыми зависимостями частот переходов дублет–дублет (для ионов Dy^{3+} и Er^{3+} см. рис. 1 и 2) и основной дублет–ближайший синглет (Ho^{3+} в LiLuF_4). В качестве „затравочных“ использовались параметры, найденные ранее из анализа оптических спектров [8]. Как видно из таблицы, относительно небольшие изменения этих параметров дают возможность удовлетворительно описать спектры рассмотренных кристаллов во внешнем магнитном поле.

Параметры кристаллического поля (см^{-1}) в кристаллах LiY(Lu)F₄:Ln³⁺ (в скобках приведены литературные данные для Dy³⁺ [8], Ho³⁺ [3], Er³⁺ [8])

Параметр	Dy ³⁺ (4f ⁹)	Ho ³⁺ (4f ¹⁰)		Er ³⁺ (4f ¹¹)
	LiYF ₄	LiLuF ₄	LiYF ₄	LiYF ₄
B ₂ ⁰	165 (165)	188.35	(190)	200 (190)
B ₄ ⁰	-87 (-88)	-80.5	(-78.25)	-79.2 (-80)
B ₆ ⁰	-4.2 (-4.4)	-3.5	(-3.25)	-3.1 (-2.3)
B ₄ ⁴	-691 (-980)	-640.23	(-657.2)	-672 (-1020)
B ₄ ⁻⁴	-646 (0)	-623.63	(-568.6)	-579 (0)
B ₆ ⁴	-370 (-427)	-379.04	(-364)	-331 (-420)
B ₆ ⁻⁴	-223 (65)	-230.3	(-222)	-211 (70)

Параметры КР в кристалле LiYF₄:Ho³⁺ были определены ранее в работе [3] также из моделирования спектра ЭПР в области переходов дублет–ближайший синглет Г₂¹; вычисленные с этими параметрами полевые зависимости частот переходов дублет–второй синглет Г₂² и синглет Г₂¹–синглет Г₂² хорошо согласуются с данными измерений (рис. 4), если увеличить вычисленную энергию синглета Г₂² на 1.86 см^{-1} .

Параметры оператора (3) — случайные величины с нормальным распределением вероятностей [3]. Из сравнения вычисленных интенсивностей запрещенных переходов между сверхтонкими подуровнями основного дублета и переходов дублет–синглет Г₂¹ ионов Ho³⁺ в полях $\mathbf{B} \parallel \mathbf{B}_1 \parallel \mathbf{c}$ в кристалле LiYF₄:Ho (1%) с данными измерений (рис. 5) мы получили наиболее вероятные значения $|B_2^1| \sim |B_2^{-2}| \sim 1.25 \text{ см}^{-1}$, которые в 2.7 раза больше, чем соответствующие величины, найденные в работе [3] для кристалла LiYF₄:Ho (0.1%). Увеличение средних характеристик случайного КП с концентрацией ионов гольмия указывает на то, что, по-видимому, несмотря на малое различие ионных радиусов ионов Y³⁺ и Ho³⁺, примесные ионы существенно возмущают кристаллическую решетку.

Изотопическая структура сигналов ЭПР РЗ-ионов в кристаллах ⁶Li_xLi_{1-x}Y(Lu)F₄ формируется вследствие различного изотопического состава в ближайших к РЗ-иону литиевых позициях [13,14]. Две четверки ионов Li⁺ находятся в узлах L₁ и L₂ с координатами (относительно примесного иона) ($\pm a/2; a/2; 0$), ($\pm a/2; -a/2; 0$) и ($\pm a/2; 0; c/4$), ($0; \pm a/2; -c/4$) соответственно, где a и c — постоянные решетки. При низких температурах кристаллическая решетка расширяется (сжимается) вблизи примесного изотопа ⁶Li(⁷Li) в кристалле ⁷LiRF₄(⁶LiRF₄). В частности, вычисленные компоненты вектора смещения одного из четырех ионов F⁻, ближайших к изотопу ⁶Li, с координатами (0.146; 0.085; 0.087) nm в кристалле ⁷LiYF₄ при температуре 4 K в кристаллографической системе координат с центром на дефекте массы равны (4.03; 1.96; 2.32)·10⁻⁵ nm. КП на РЗ-ионах изменяется в основном вследствие смещений ионов F⁻, являющихся общими ближайшими соседями

РЗ-иона и примесных изотопов ⁶Li(⁷Li) в позициях Li₁ и Li₂; соответствующие параметры операторов $\Delta H_{cf}^{L_1}$ и $\Delta H_{cf}^{L_2}$ были вычислены в рамках модели обменных зарядов. Интервалы изотопической структуры сигналов ЭПР равны разностям δ_{L_k} средних значений операторов $\Delta H_{cf}^{L_k}$ ($k = 1, 2$) на волновых функциях начального и конечного состояний соответствующего перехода.

Представленные на рис. 3 сигналы ЭПР отвечают переходам из основного дублета на нижний подуровень верхнего дублета ионов Er³⁺. Наблюдаемая изотопическая структура соответствует увеличению штарковского расщепления на 0.015 см^{-1} на один изотоп ⁶Li в ближайшем окружении иона Er³⁺ (наиболее интенсивная низкополевая линия принадлежит спектру ионов Er³⁺ в окружении восьми ионов ⁷Li⁺). Результаты вычислений ($\delta_{L_1} = 0.0185$, $\delta_{L_2} = 0.006 \text{ см}^{-1}$) согласуются с данными измерений по знаку и порядку величины, доминирующую роль в формировании структуры играют центры с изотопами ⁶Li в четырех позициях L₁.

Из анализа структуры сигналов ЭПР ионов Ho³⁺ следует, что энергия синглета Г₂¹ уменьшается на 0.012 см^{-1} ($\delta_{L_1} = -0.010 \text{ см}^{-1}$, $\delta_{L_2} = -0.003 \text{ см}^{-1}$), а разность энергий синглетов Г₂² и Г₂¹ увеличивается на 0.009 см^{-1} ($\delta_{L_1} = 0.007 \text{ см}^{-1}$, $\delta_{L_2} = 0.004 \text{ см}^{-1}$) на один изотоп ⁶Li в ближайшем окружении иона Ho³⁺. Приведенные в скобках вычисленные интервалы изотопической структуры качественно согласуются с экспериментальными данными.

4. Заключение

Измеренные в настоящей работе полевые зависимости частоты сигналов ЭПР кристаллов LiYF₄, содержащих ионы Er³⁺, Dy³⁺ и Ho³⁺, и кристалла LiLuF₄:Ho³⁺ интерпретированы в рамках приближения КП с использованием параметров, согласующихся с данными оптической спектроскопии.

Сравнение спектров ЭПР ионов Ho³⁺ в кристаллах с естественным содержанием изотопов лития со спектрами кристаллов, обогащенных по изотопам ⁷Li и ⁶Li, позволило однозначно интерпретировать обнаруженную тонкую структуру спектральных линий как результат изотопического беспорядка в литиевых подрешетках. Оценки интервалов изотопической структуры на основе расчета смещений ионов фтора, ближайших к изолированному примесному изотопу ⁶Li в решетке ⁷LiYF₄, и соответствующих изменений КП в соседних позициях РЗ-ионов согласуются по знаку и порядку величины с данными измерений.

Сдвиги частот линий-сателлитов, соответствующих димерам (Ho³⁺)₂ в кристаллах LiYF₄ и LiLuF₄, согласуются с результатами анализа спектров парных центров с учетом магнитного диполь-дипольного взаимодействия между ионами и локальной деформации решетки при замещении ионов Y³⁺ и Lu³⁺ ионами Ho³⁺.

Список литературы

- [1] J. Magarino, J. Tuchendler, P. Beauvillain, I. Laursen. Phys. Rev. B **21**, 18 (1980).
- [2] J. Magarino, J. Tuchendler, J.P.D'Haenens, A. Linz. Phys. Rev. B **13**, 2805 (1976).
- [3] G.S. Shakurov, M.V. Vanyunin, B.Z. Malkin, B. Barbara, R.Y. Abdulsabirov, S.L. Korableva. Appl. Magn. Res. **28**, 251 (2005).
- [4] V.F. Tarasov, G.S. Shakurov. Appl. Magn. Res. **2**, 571 (1991).
- [5] N.I. Agladze, M.N. Popova, G.N. Zhizhin, V.J. Egorov, M.A. Petrova. Phys. Rev. Lett. **66**, 477 (1991).
- [6] J.P. Sattler, J. Nemarich. Phys. Rev. B **4**, 1 (1971).
- [7] А.А. Антипин, Б.Н. Казаков, С.Л. Кораблева, Р.М. Рахматуллин, Ю.К. Чиркин, А.А. Федий. Изв. вузов. Физика **9**, 93 (1978).
- [8] М.П. Давыдова, С.Б. Зданович, Б.Н. Казаков, А.Л. Столов, С.Л. Кораблева. Опт. и спектр. **42**, 547 (1977).
- [9] E.P. Chukalina, M.N. Popova, S.L. Korableva, R.Yu. Abdulsabirov. Phys. Lett. A **269**, 348 (2000).
- [10] N.I. Agladze, M.N. Popova. Solid State Commun. **55**, 1097 (1985).
- [11] М.Н. Попова, С.А. Климин, Е.П. Чукалина, Г.Н. Жижин, С.Л. Кораблева, Р.Ю. Абдулсабиров. Опт. и спектр. **97**, 57 (2004).
- [12] J. Kirton. Phys. Rev. A **139**, A 1930 (1965).
- [13] Н.И. Агладзе, М.Н. Попова, М.А. Корейба, Б.З. Малкин, В.Р. Пекуровский. ЖЭТФ **104**, 4171 (1993).
- [14] B.Z. Malkin, S.K. Saikin. Proc. SPIE **2706**, 193 (1996).