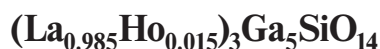


УДК 537.622

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНОГО ИОНА НА МАКРОСКОПИЧЕСКИЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЛАНГАСИТА

© 2024 г. А. Ю. Тихановский^{1,*}, В. Ю. Иванов¹, А. М. Кузьменко¹, А. А. Мухин¹

Представлено академиком РАН И.А. Щербаковым 19.04.2023 г.

Поступило 19.04.2023 г.

После доработки 19.04.2023 г.

Принято к публикации 14.11.2023 г.

Выполнено экспериментальное и теоретическое исследование магнитных свойств уникального изинговского парамагнетика $(\text{La}_{0.985}\text{Ho}_{0.015})_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$. Обнаружена анизотропия намагниченности при вращении сильного магнитного поля (до 5 Тл) в плоскостях ab^* , b^*c и ac при низкой температуре ($T \leq 5\text{K}$). Показано, что наблюдаемые особенности намагниченности связаны с локальной ориентацией и распределением изинговских осей редкоземельного иона Ho^{3+} , отклонение которых от разрешенных симметрией направлений может возникать в результате случайного заполнения Ga/Si в локальном окружении магнитных ионов.

Ключевые слова: редкоземельные лангаситы, изинговский парамагнетик, анизотропия намагниченности, магнитные свойства

DOI: 10.31857/S2686740024010056, EDN: OSYAGV

Соединения со структурой лангасита $(\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14})$ [1, 2] вызывают значительный интерес благодаря сильным пьезоэлектрическим эффектам и нелинейным оптическим свойствам [3–5]. Они имеют нецентросимметричную пространственную группу $R\bar{3}21$, а при наличии в решетке магнитных ионов обладают нетривиальной магнитной структурой и могут проявлять магнитоэлектрические свойства. Например, железосодержащие лангаситы (типа $\text{Ba}_3\text{NbFe}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$) упорядочиваются антиферромагнитно при $T_N \sim 27\text{K}$ в треугольную спиральную магнитную структуру, с двойной магнитной киральностью [6, 7] и проявляют магнитоэлектрические свойства во внешнем магнитном поле [8–10]. Однако наличие сложной магнитной структуры затрудняет исследование микроскопических механизмов возникновения магнитоэлектрического эффекта, особенно во внешнем магнитном поле.

С этой точки зрения интерес представляют редкоземельные лангаситы $\text{R}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ ($\text{R} = \text{La}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Tb}, \text{Dy}, \text{Ho}, \dots$), например, хорошо исследованные концентрированные соединения $\text{Nd}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ и $\text{Pr}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ [11–16], которые остаются парамагнитными вплоть до самых низких температур (30 мК). Однако соединения с тяжелыми редкоземельными ионами с большими магнитными моментами ($\text{Tb}, \text{Dy}, \text{Ho}, \dots$), в которых ожидаются более сильные проявления микроскопических механизмов магнитных свойств, устойчивы только при их низких концентрациях в твердых растворах с лантаном.

Впервые магнитные и магнитоэлектрические свойства в легированном соединении на основе лантана $(\text{La}_{0.985}\text{Ho}_{0.015})_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ с тяжелым редкоземельным ионом Ho^{3+} были исследованы в работе [17]. Авторами показано, что магнитные и магнитоэлектрические свойства соединения определяются поведением в магнитном поле некрамерсовского квазидублета Ho^{3+} , хорошо отделенного от остального мультиплета, именно с последним связано изинговское поведение иона. Как и концентрированные

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук, Москва, Россия
*E-mail: tikhanovskii@phystech.edu

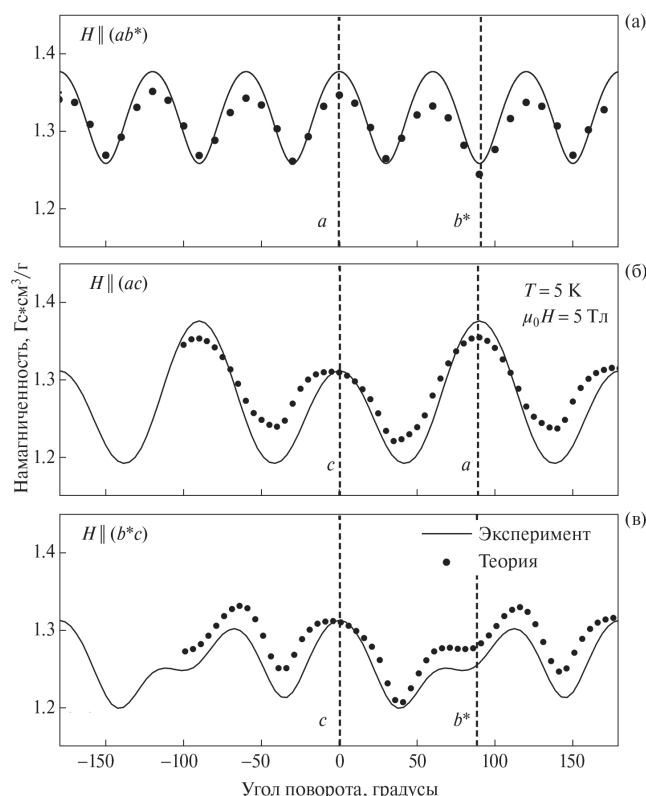


Рис. 1. Угловые зависимости намагниченности $(\text{La}_{0.985}\text{Ho}_{0.015})_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ при температуре 5 К и вращении поля величиной 5 Тл в плоскостях ab^* (а), ac (б) и b^*c (в). Точки — эксперимент, сплошная линия — теория.

составы, соединение остается в парамагнитном состоянии вплоть до низких температур. Однако предложенная в [17] модель основного состояния редкоземельного иона и направлений изинговских осей не описывает некоторые особенности намагниченности.

Для выяснения поведения ионов Ho^{3+} в магнитном поле и уточнения ориентаций изинговских осей мы выполнили комплексное экспериментальное и теоретическое исследование магнитных свойств $(\text{La}_{0.985}\text{Ho}_{0.015})_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$. Исследование полевых зависимостей намагниченности соединения проведено при ориентации магнитного поля вдоль основных кристаллографических направлений при низких температурах, а исследование анизотропии намагниченности при вращении магнитного поля величиной 5 Тл в плоскостях ab^* , ac и b^*c при температуре 5 К. Используя полученные экспериментальные данные, мы уточнили предложенную в [17] модель, определили ориентации

изинговских осей, выявили особенности их распределения и роль локальных искажений в макроскопических свойствах кристалла.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Кристалл $(\text{La}_{0.985}\text{Ho}_{0.015})_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ был выращен Б.В. Миллем методом Чохральского. Качество кристаллов определялось посредством рентгенофазового анализа и на растровом электронном микроскопе в режиме z-контраста. Наличие посторонних фаз, помимо лангаситной, обнаружено не было. Ориентация монокристаллов определялась методом Laue. Магнитные свойства соединения исследовались на установке MPMS-50 (Quantum Design) в полях до 5 Тл и при низких температурах 1.9–5 К.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Нами выполнено подробное исследование магнитных свойств $(\text{La}_{0.985}\text{Ho}_{0.015})_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$. Проведены измерения ориентационных зависимостей намагниченности при вращении магнитного поля в плоскостях ab^* , b^*c и ac . Выполнены измерения полевых зависимостей намагниченности вдоль основных кристаллографических направлений при различных температурах.

Среди проведенных магнитных измерений наибольший интерес представляют ориентационные зависимости намагниченности. При низких температурах и сильных магнитных полях (при которых магнитные моменты являются насыщенными) в угловых зависимостях намагниченности проявляется заметная анизотропия во всех трех плоскостях: ab^* , b^*c , ac (рис. 1), которая связана с особенностями ориентаций изинговских осей Ho^{3+} (см. раздел 3).

В области насыщения (при $\mu_0 H = 5$ Тл и $T \lesssim 5$ К) в ab^* плоскости наблюдается 60-градусная анизотропия с максимумом вдоль оси a и минимумом вдоль оси b^* (направление, ортогональное оси второго порядка a) (рис. 1а). В плоскости ac между двумя неэквивалентными по величине максимумами (при $H \parallel a$ и $H \parallel c$) возникает асимметричный минимум (рис. 1б). Наиболее ярко особенности анизотропии намагниченности проявляются в b^*c плоскости. Угловая зависимость оказалась асимметричной

относительно оси c , вдоль которой наблюдается один из максимумов (рис. 1в). При вращении магнитного поля по и против часовой стрелки относительно оси c минимумы имеют разную глубину, а следующие за ними максимумы — разную величину. Ось b^* расположена вблизи одного из локальных минимумов, но не совпадает с ним. При этом относительно оси b^* существует асимметрия, которая, как и все вышеперечисленные особенности, возникает из-за необычной ориентации изинговских осей (рис. 2). Важно отметить, что несмотря на сложный характер анизотропии, она соответствует кристаллографической симметрии $P321$.

Поведение кривых намагничивания при низких температурах сильно зависит от ориентации магнитного поля. Когда поле направлено вдоль осей a , b^* и c , насыщение, при низких температурах, происходит в полях ~ 1 Тл, при этом сохраняется небольшая восприимчивость (рис. 3), связанная с ван-флековским вкладом. В случае ориентации поля вдоль минимума на угловых зависимостях (рис. 3б, $-H||c39^\circ b^*$), насыщение намагниченности также происходит в полях ~ 1 Тл, но в области насыщения наблюдается большой угол наклона, связанный с отклонением от изинговского поведения иона Ho^{3+} .

ТЕОРИЯ

Модель магнитной структуры

В лангасите $(\text{La}_{0.985}\text{Ho}_{0.015})_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ магнитные ионы Ho^{3+} занимают три низкосимметричные позиции симметрии C_2 с локальной осью, совпадающей с одной из трех кристаллографических осей 2-го порядка (a , b , $-a-b$) и остаются в парамагнитном состоянии вплоть до низких температур. Особенности кристаллической структуры, а именно случайное распределение Ga/Si в позициях $2d$, приводят к локальному нарушению симметрии C_2 и искажению кристаллического поля. В результате магнитные ионы оказываются в несимметричных позициях, что и обуславливает их особое поведение в магнитном поле.

Кристаллическое поле расщепляет основной мультиплет 5I_8 , на $2J + 1 = 17$ синглетов. Магнитные свойства иона Ho^{3+} в лангасите в основном определяются двумя нижними близко расположенными энергетическими уровнями

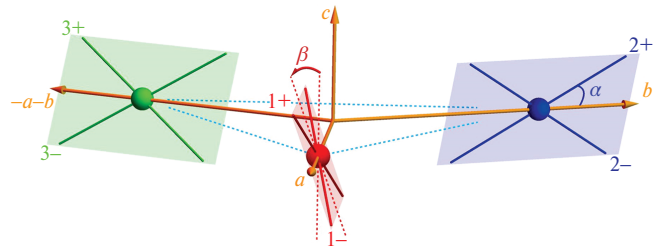


Рис. 2. Схематическое изображение изинговских осей ионов Ho^{3+} в $(\text{La}_{0.985}\text{Ho}_{0.015})_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$: α — отклонение изинговской оси от плоскости ab (для удобства изображено в позиции 2), β — отклонение проекции изинговской оси на плоскость b^*c от оси c . Заданный таким образом набор изинговских осей, связанных операциями симметрии C_2 и C_3 , восстанавливает симметрию $P321$.

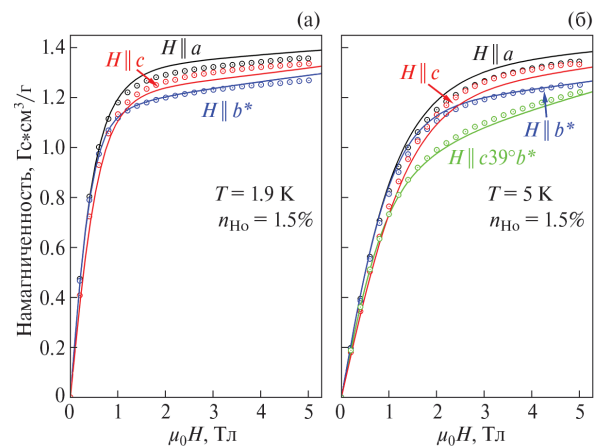


Рис. 3. Полевые зависимости намагниченности $(\text{La}_{0.985}\text{Ho}_{0.015})_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ при температурах 1.9 К (а), 5 К (б) и ориентациях магнитного поля $H || a$, b^* , c и $c39^\circ b^*$ — соответствующего минимума на угловой зависимости, при вращении магнитного поля в плоскости b^*c . Открытые символы — эксперимент, сплошная линия — теория.

(квазидублет с расщеплением $2\Delta_{cf} \approx 3$ К), хорошо отделенными от возбужденных состояний мультиплета, в результате поведение магнитных ионов оказывается сильно анизотропным, что позволяет их рассматривать как изинговские. Это подтверждается полевыми зависимостями намагниченности при низких температурах, которые в малых полях имеют большой наклон и быстро насыщаются в полях ~ 1 Тл (рис. 3).

В силу отсутствия симметрии локального окружения магнитного иона Ho^{3+} мы предполагаем, что в позиции 1 изинговская ось $\mathbf{n}_i(\alpha, \beta) = (\cos\alpha, -\sin\alpha \sin\beta, \sin\alpha \cos\beta)$ произвольно

ориентирована в пространстве, где α — отклонение от оси a в плоскости ac , β — отклонение проекции изинговской оси на плоскость b^*c от оси c (рис. 2).

Анализ угловых зависимостей показывает, что в действительности существует некоторое распределение изинговских осей по углам. При его отсутствии анизотропия угловых зависимостей оказалась бы значительно больше, а в минимумах наблюдался бы резкий перегиб. Распределение может возникать в результате реализации различных конфигураций Ga/Si в окружении редкоземельного иона. Мы предполагаем, что вероятные направления изинговских осей задаются двумерным распределением Гаусса:

$$\rho(\alpha, \beta) = \exp\left[-\frac{(\alpha - \bar{\alpha})^2}{2\sigma_\alpha^2}\right] \exp\left[-\frac{(\beta - \bar{\beta})^2}{2\sigma_\beta^2}\right] / 2\pi\sigma_\alpha\sigma_\beta,$$

с наиболее вероятными значениями $\bar{\alpha}$, $\bar{\beta}$ и дисперсиями σ_α , σ_β , определяемыми из моделирования магнитных свойств соединения, однако важно отметить, что в действительности функция распределения может иметь иной вид.

Глобальная симметрия кристалла P321 сохраняется при наличии локальных искажений позиций и отклонении изинговских осей, благодаря тому, что при случайном распределении Ga/Si найдутся позиции с ориентациями изинговских осей, которые связаны с некоторой произвольно ориентированной осью $\mathbf{n}_i(\alpha, \beta)$ операциями симметрии C_2 и C_3 . Сохранение симметрии C_2 определяет вид функции распределения направлений изинговских осей позиции 1. Под действием C_2 угол β переходит в $\beta + \pi$, что эквивалентно изменению значения наиболее вероятного угла на $\beta - \pi$:

$$\begin{aligned} \rho'(\alpha, \beta) &= \\ &= \exp\left[-\frac{(\alpha - \bar{\alpha})^2}{2\sigma_\alpha^2}\right] \exp\left[-\frac{(\beta - (\bar{\beta} - \pi))^2}{2\sigma_\beta^2}\right] / 2\pi\sigma_\alpha\sigma_\beta. \end{aligned}$$

Тогда функция распределения осей в позиции 1 $\rho_+ = \frac{1}{2}(\rho + \rho')$ является инвариантной относительно преобразования симметрии C_2 . Позиции 2 и 3 связаны с 1 поворотом на 120° вокруг оси c , а произвольно ориентированные

изинговские оси $\mathbf{n}_{2,3}(\alpha, \beta) = \hat{3}_c^\pm \mathbf{n}_1(\alpha, \beta)$ задаются соответствующими матрицами поворота $\hat{3}_c^\pm$, при этом функция распределения остается неизменной. Заданные таким образом функция распределения в позиции 1 и изинговские оси в позициях 2 и 3 восстанавливают симметрию P321, несмотря на ее локальные нарушения (рис. 2).

Построенная таким образом модель позволяет качественно объяснить особенности угловых зависимостей намагниченности в области насыщения магнитных моментов ($H > 1$ Тл, $T \lesssim 5$ К). При ориентации магнитного поля ортогонально наиболее вероятным направлениям изинговских осей $\mathbf{n}_i(\bar{\alpha}, \bar{\beta})$ в угловых зависимостях возникают минимумы (рис. 1а–в). Например, вблизи $H \parallel b^*$, при отклонении магнитного поля от оси c на угол $\theta_H \approx 86^\circ$, когда поле ортогонально направлениям $\mathbf{n}_1(\bar{\alpha}, \bar{\beta})$ и $\mathbf{n}_1(\bar{\alpha}, \bar{\beta} - \pi)$, существует общий локальный минимум (рис. 1в). Из согласованного моделирования всех угловых зависимостей намагниченности мы определили наиболее вероятное направление изинговской оси: $\bar{\alpha} \approx 32^\circ$ и $\bar{\beta} \approx 4^\circ$.

Намагниченность

Для описания магнитных свойств $(\text{La}_{0.985}\text{Ho}_{0.015})_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$, аналогично работе [17], использован спин-гамильтониан, учитывающий расщепление квазидублета в кристаллическом поле, зеемановскую энергию, ван-Флекавский вклад:

$$H_{\text{eff}}^{(i)} = \Delta_{\text{cf}} \sigma_x^i + \mathbf{m}_i \mathbf{H} \sigma_y^i - \frac{1}{2} \mathbf{H} \hat{\chi}_{VV} \mathbf{H},$$

где $\sigma_{x,y}^i$ — матрицы Паули, i — номер позиции, $j = x, y, z$, $\mathbf{m}_i = \mu_0 \mathbf{n}_i$, $\mathbf{H}$ — вектор магнитного поля, $\hat{\chi}_{VV}$ — матрица восприимчивости Ван Флека. Энергетические уровни основного некрамерсовского квазидублета иона Ho^{3+} в i -й позиции, полученные диагонализацией гамильтониана, равны $\pm \epsilon_i$, где

$$\epsilon_i = \sqrt{(\mathbf{m}_i \mathbf{H})^2 + \Delta_{\text{cf}}^2}.$$

Минимизацией свободной энергии двухуровневой системы с энергетическими уровнями $\pm \epsilon_i$ по вектору магнитного поля $\mathbf{H}$ получен суммарный вклад в намагниченность от трех позиций:

$$\begin{aligned} \mathbf{M} &= \iint \frac{1}{3} n_{\text{Ho}} \sum_i \mathbf{m}_i(\alpha, \beta) (\mathbf{m}_i(\alpha, \beta) \mathbf{H}) \times \\ &\times \frac{\tanh \epsilon_i(\alpha, \beta) / k_B T}{\epsilon_i(\alpha, \beta)} \rho_+(\alpha, \beta) d\alpha d\beta + \hat{\chi}_{VV} \mathbf{H}, \end{aligned}$$

где n_{Ho} — концентрация ионов Ho^{3+} , T — температура и k_b — постоянная Больцмана.

В рамках сформулированной модели магнитной структуры мы выполнили моделирование угловых (рис. 1) и полевых зависимостей намагниченности (рис. 3). Из моделирования полевых зависимостей намагниченности определены концентрация ионов Ho^{3+} $n_{Ho}=1.45\%$ и их магнитный момент $\mu_0=9.4\mu_B$.

При ориентации магнитного поля вдоль кристаллографических осей $H \parallel a$, b^* и c в области насыщения существует небольшой наклон кривых намагниченности, а при ориентации магнитного поля вдоль одного из минимумов угловых зависимостей $H \parallel c39^\circ b$ (рис. 3) этот наклон существенно возрастает. Последнее связано с отклонением от изинговского поведения иона Ho^{3+} [18], возникающего в результате влияния верхних (возбужденных) уровней на основной квазидублет, которое в общем случае зависит от спектра и волновых функций иона, но в данной работе вклады были определены из моделирования кривых намагничивания и, для упрощения, опущены. Величины ванфлековской восприимчивости составили $\chi_{VVa} = \chi_{VVb^*} = 2.74 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$, $\chi_{VVC} = 1.20 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{г}$.

Учет распределения направлений изинговских осей приводит к размытию минимумов угловых зависимостей и, в совокупности с отклонением от изинговского поведения, позволяет количественно описать их при величинах дисперсий $\sigma_\alpha = 6.7^\circ$ и $\sigma_\beta = 8^\circ$ (рис. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнено экспериментальное и теоретическое исследование магнитных свойств замещенного лангасита $(La_{0.985}Ho_{0.015})_3Ga_5SiO_{14}$. Экспериментальное исследование намагниченности показало, что насыщение полевых зависимостей происходит в полях ~ 1 Тл, при этом их наклон в области насыщения сильно зависит от ориентации магнитного поля. Вращение магнитного поля в различных плоскостях позволило выявить анизотропию намагниченности. Теоретический анализ полученных экспериментальных данных показал, что основное состояние изинговского некрамерсовского иона Ho^{3+} сильно искажено, это проявляется в отклонении изинговских осей

от разрешенных локальной симметрией C_2 направлений. Мы предполагаем, что искажение является следствием нарушения симметрии локального окружения, которое может возникать в результате равновероятного заполнения Ga/Si позиций $2d$. Таким образом, мы установили связь магнитных свойств $(La_{0.985}Ho_{0.015})_3Ga_5SiO_{14}$ с микроскопическими характеристиками редкоземельного иона Ho^{3+} и показали, что локальные нарушения симметрии могут приводить к специфическим макроскопическим особенностям.

БЛАГОДАРНОСТИ

Статья написана по материалам одноименного доклада на 5-й школе-конференции молодых ученых ИОФ РАН “Прохоровские недели”, 2022 г. Доклад был рекомендован к публикации по результатам экспертных оценок как один из лучших.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-42-05004).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mill B.V., Pisarevsky Y.V. Langasite-type materials: from discovery to present state // Proc. 2000 IEEE/EIA International Frequency Control Symposium and Exhibition (Cat. No.00CH37052). IEEE. 2000. P. 133–144.
<https://doi.org/10.1109/FREQ.2000.887343>
2. Maksimov B.A. et al. Absolute structure of $La_3Ga_5SiO_{14}$ langasite crystals // Crystallogr. Reports. 2005. V. 50. № 5. P. 751–758.
<https://doi.org/10.1134/1.2049391>
3. Bohm J. et al. Czochralski growth and characterization of piezoelectric single crystals with langasite structure: $La_3Ga_5SiO_{14}$ (LGS), $La_3Ga_5.5Nb_{0.5}O_{14}$ (LGN), and $La_3Ga_5.5Ta_{0.5}O_{14}$ (LGT) // J. Cryst. Growth. 1999. V. 204. № 1–2. P. 128–136.
[https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(99\)00186-4](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(99)00186-4)
4. Sato J. et al. Czochralski growth of $RE_3Ga_5SiO_{14}$ ($RE=La, Pr, Nd$) single crystals for the analysis of the influence of rare earth substitution on piezoelectricity // J. Cryst. Growth. 1998. V. 191. № 4. P. 746–753.
[https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(98\)00362-5](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(98)00362-5)

5. *Iwataki T. et al.* Mechanism of the piezoelectricity of langasite based on the crystal structures // J. Eur. Ceram. Soc. 2001. V. 21. № 10–11. P. 1409–1412. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(01\)00029-2](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(01)00029-2)
6. *Marty K. et al.* Magnetic and dielectric properties in the langasite-type compounds: $A_3 B Fe_3 D_2 O_{14}$ ($A=Ba, Sr, Ca$; $B=Ta, Nb, Sb$; $D=Ge, Si$) // Phys. Rev. B – Condens. Matter Mater. Phys. 2010. V. 81. № 5. P. 1–11. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.81.054416>
7. *Marty K. et al.* Single Domain Magnetic Helicity and Triangular Chirality in Structurally Enantiopure $Ba_3NbFe_3Si_2O_{14}$ // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 101. № 24. P. 247201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.247201>
8. *Lee N., Choi Y.J., Cheong S.W.* Magnetic control of ferroelectric polarization in a self-formed single magnetoelectric domain of multiferroic $Ba_3NbFe_3Si_2O_{14}$ // Appl. Phys. Lett. 2014. V. 104. № 7. P. 1–5. <https://doi.org/10.1063/1.4866187>
9. *Narita H. et al.* Observation of nonreciprocal directional dichroism via electromagnon resonance in a chiral-lattice helimagnet $Ba_3NbFe_3Si_2O_{14}$ // Phys. Rev. B. 2016. V. 94. № 9. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.94.094433>
10. *Tikhanovskii A.Y. et al.* Magnetoelectric phenomena in Fe langasites // Phys. Rev. B. American Physical Society. 2022. V. 105. № 10. P. 104424. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.105.104424>
11. *Zhou H.D. et al.* Partial field-induced magnetic order in the Spin-liquid kagomé $Nd_3Ga_5SiO_{14}$ // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 99. № 23. P. 1–4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.236401>
12. *Zorko A. et al.* Easy-Axis Kagome Antiferromagnet: Local-Probe Study of $Nd_3Ga_5SiO_{14}$ // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. № 14. P. 147201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.147201>
13. *Bordet P. et al.* Magnetic frustration on a Kagomé lattice in $R_3Ga_5SiO_{14}$ langasites with $R \leq Nd, Pr$ // J. Phys. Condens. Matter. 2006. V. 18. № 22. P. 5147–5153. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/18/22/014>
14. *Simonet V. et al.* Hidden magnetic frustration by quantum relaxation in anisotropic Nd langasite // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. № 23. P. 1–4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.237204>
15. *Robert J. et al.* Spin-Liquid Correlations in the Nd-Langasite Anisotropic Kagomé Antiferromagnet // Phys. Rev. Lett. 2006. V. 96. № 19. P. 197205. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.197205>
16. *Zorko A. et al.* Ground State of the easy-axis rare-earth kagome langasite $Pr_3Ga_5SiO_{14}$ // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 104. № 5. P. 3–6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.057202>
17. *Weymann L. et al.* Unusual magnetoelectric effect in paramagnetic rare-earth langasite // npj Quantum Mater. 2020. V. 5. № 1. P. 61. <https://doi.org/10.1038/s41535-020-00263-9>
18. *Звездин А.К., Матвеев В.М., Мухин А.А., Попов А.И.* Редкоземельные ионы в магнитно упорядоченных кристаллах. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1985. 296 с.

EFFECT OF RARE-EARTH ION LOCAL ANISOTROPY ON MACROSCOPIC MAGNETIC PROPERTIES OF $(La_{0.985}Ho_{0.015})_3Ga_5SiO_{14}$ LAGNASITE

A. Yu. Tikhanovskii^a, V. Yu. Ivanov^a, A. M. Kuzmenko^a, A. A. Mukhin^a

^a*Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Presented by Academician of the RAS I.A. Shcherbakov

Experimental and theoretical studies of the magnetic properties of the unique Ising-like paramagnet $(La_{0.985}Ho_{0.015})_3Ga_5SiO_{14}$ have been carried out. We found magnetic anisotropy in strong magnetic field (up to 5 T) rotated in the ab^* , b^*c and ac planes at low temperatures ($T \leq 5$ K). We show that the observed magnetization features are connected with the local orientation and distribution of the Ho^{3+} Ising axes, which may deviate from the symmetry-allowed directions due to Ga/Si random filling in the local environment of the magnetic ions.

Keywords: rare-earth langasite, Ising-like paramagnet, magnetic anisotropy, magnetic properties