

## Усиление межподрешеточного обменного взаимодействия в нитридах $R(\text{Fe}, \text{Ti})_{12}\text{N}$ ( $R = \text{Ho}$ и $\text{Er}$ )

И. С. Терёшина<sup>a</sup>

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы д. 1, стр. 2.

Поступила в редакцию 14.02.2020, после доработки 25.02.2020, принята к публикации 03.03.2020.

Проанализированы полевые зависимости намагниченности азотсодержащих соединений  $R(\text{Fe}, \text{Ti})_{12}\text{N}$  ( $R = \text{Ho}$  и  $\text{Er}$ ). Обнаружено, что исходный образец  $\text{HoFe}_{11}\text{Ti}$  при  $T = 4.2$  К демонстрирует анизотропию типа легкая ось, однако в результате азотирования тип анизотропии меняется на конус осей легкого намагничивания. В нитридах  $\text{HoFe}_{11}\text{TiN}$  и  $\text{ErFe}_{11}\text{TiN}$  так же, как и в исходных образцах  $\text{HoFe}_{11}\text{Ti}$  и  $\text{ErFe}_{11}\text{Ti}$ , наблюдается каскад индуцированных внешним магнитным полем спин-переориентационных фазовых переходов. В рамках теории молекулярного поля оценено влияние азотирования на межподрешеточные обменные взаимодействия. Установлено, что молекулярное поле, действующее со стороны подрешетки железа на редкоземельные ионы гольмия и эрбия, усиливается. Проведено сравнение влияния азотирования и гидрирования на межподрешеточный обмен.

**Ключевые слова:** интерметаллиды, нитриды, намагниченность, обменные взаимодействия.

УДК: 537.622.6 : 537.624.9. PACS: 75.50.Bb, 75.30.Et, 75.50.Gg.

### ВВЕДЕНИЕ

Соединения  $R(\text{Fe}, \text{T})_{12}$  ( $R$  — редкоземельный металл (РЗМ),  $T$  — Ti, V, Mo, W, Ta, Cr, Al, Si и др.) с тетрагональной кристаллической структурой типа  $\text{ThMn}_{12}$  привлекают к себе внимание: во-первых, как материалы, на основе которых могут быть получены высокоэнергетические ресурсосберегающие постоянные магниты [1–5], во-вторых, как соединения, демонстрирующие большое количество магнитных фазовых переходов как спонтанных, так и индуцированных внешним магнитным полем [6–8]. Такие соединения могут быть использованы как рабочие тела высокоточных датчиков. Среди материалов первой группы важное место занимают азотсодержащие соединения  $R(\text{Fe}, \text{T})_{12}\text{N}$  [9–11]. Магнитная структура таких соединений может быть рассмотрена как состоящая из двух подрешеток: подрешетки РЗМ и подрешетки Fe. Магнитные моменты отдельных подрешеток упорядочиваются благодаря трем типам обменных взаимодействий, действующих внутри РЗМ и Fe подрешеток ( $R$ – $R$  и  $\text{Fe}$ – $\text{Fe}$  соответственно), а также между подрешетками (взаимодействия  $R$ – $\text{Fe}$ ) [12–14]. Магнитные свойства подрешетки Fe, как правило, изучают, используя соединения с немагнитными РЗМ такими, как иттрий и лютеций [15, 16]. Исходные соединения  $\text{Y}(\text{Fe}, \text{T})_{12}$  и  $\text{Lu}(\text{Fe}, \text{T})_{12}$ , их нитриды, карбиды и гидриды достаточно часто демонстрируют сильную одноосную анизотропию [9, 17, 18]. Ранее в работах [19, 20] нами были подробно изучены структурные и магнитные свойства одноосных магнетиков  $\text{LuFe}_{11}\text{Ti}(\text{H}, \text{N})_x$  и  $\text{YFe}_{11}\text{Ti}(\text{H}, \text{N})_x$  ( $x = 0; 1$ ).

Структура типа  $\text{ThMn}_{12}$  обладает объемно-центрированной тетрагональной кристаллической решеткой с пространственной группой симметрии  $I4/mmm$ . Элементарная ячейка содержит две формульные единицы. В ряду двойных редкоземельных соединений с железом  $R\text{Fe}_{12}$  структура типа  $\text{ThMn}_{12}$  не существует. Однако при небольших добавках тре-

тьего компонента реализуется устойчивая структура с общей формулой  $R\text{Fe}_{12-x}\text{T}_x$  [6]. Таким образом,  $T$  — это стабилизирующая структуру добавка (в нашей работе это титан). Атомы Fe и Ti занимают позиции  $8f$ ,  $8i$ ,  $8j$  (аналог Mn), в то время как атомы РЗМ занимают позиции  $2a$  (аналог Th). Внедрение атомов азота возможно только в позиции  $2b$ , что соответствует соседству с двумя атомами РЗМ и четырьмя атомами железа в позициях  $8j$  [9]. Внедрение атомов легких элементов приводит к увеличению объема элементарной ячейки и увеличению межатомных расстояний, упорядочению валентных связей атомов (компонент сплава) и значительному изменению магнитных свойств, особенно магнитной анизотропии, а также температур и типов спин-переориентационных фазовых переходов [21].

Исследование соединений на основе гольмия и эрбия вызывает особый интерес, поскольку ионы  $\text{Ho}^{3+}$  и  $\text{Er}^{3+}$  обладают высокими магнитными моментами —  $10\mu_B$  и  $9\mu_B$  соответственно. Магнитные свойства исходных соединений  $\text{HoFe}_{11}\text{Ti}$ ,  $\text{ErFe}_{11}\text{Ti}$ , а также гидроксида  $\text{ErFe}_{11}\text{TiN}$  были изучены при  $T = 4.2$  К в магнитных полях до  $600$  кЭ [22–24]. ( $\text{HoFe}_{11}\text{TiN}$  изучали в области температур  $77$ – $700$  К в полях до  $15$  кЭ [7]). Высокополевые кривые  $M(H)$  были проанализированы в рамках теории одноионной анизотропии по механизму кристаллического поля, а также в рамках теории молекулярного поля. Сравнение свойств исходных соединений и соединений, модифицированных атомами легких элементов внедрения, позволяет сделать важное заключение об их влиянии атомов легких элементов внедрения на параметры кристаллического поля, а также на межподрешеточные  $R$ – $\text{Fe}$  обменные взаимодействия. Последнее, как показывают многочисленные исследования [9, 14, 25], не является однозначным. Межподрешеточные  $R$ – $\text{Fe}$  обменные взаимодействия могут оставаться неизменными, усиливаться или ослабляться в зависимости от количества внедренных атомов, их сорта, а также кристаллической структуры исходных соединений. Цель данной работы — определить влияние атомов азота, внедренных

<sup>a</sup> E-mail: irina\_tereshina@mail.ru; tereshina@physics.msu.ru

в кристаллическую решетку соединений  $\text{HoFe}_{11}\text{Ti}$  и  $\text{ErFe}_{11}\text{Ti}$ , на межподрешеточные R—Fe обменные взаимодействия с помощью анализа высокополевых зависимостей намагниченности  $M(H)$  и сравнить влияния азотирования и гидрирования на межподрешеточный обмен.

## 1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Описание синтеза исходных образцов  $\text{HoFe}_{11}\text{Ti}$  и  $\text{ErFe}_{11}\text{Ti}$ , а также процедуры азотирования можно найти в работах [22, 26]. Рентгеновский фазовый анализ, выполненный на дифрактометре «Дрон-3М» (излучение  $\text{Cu—K}\alpha$ ) при комнатной температуре на порошковых образцах  $\text{HoFe}_{11}\text{TiN}$  и  $\text{ErFe}_{11}\text{TiN}$ , показал, что полученные нитриды  $\text{HoFe}_{11}\text{TiN}$  и  $\text{ErFe}_{11}\text{TiN}$  являются однофазными (отражения  $\alpha$ -Fe на дифрактограммах не обнаружены). Было установлено, что в нитридах сохраняется тетрагональная структура типа  $\text{ThMn}_{12}$ . Объем элементарной ячейки расширяется по сравнению с исходными составами на  $\sim 3\%$ .

Исследование магнитных свойств нитридов проводилось на порошковых образцах, предварительно ориентированных в статическом магнитном поле  $\sim 7$  кЭ. Сорентированный порошок фиксировался с помощью эпоксидной смолы. Образцам придавалась форма шариков, что обеспечивало корректный учет размагничивающего фактора образцов, что важно для теоретической обработки полевых зависимостей намагниченности  $M(H)$ . Кривые  $M(H)$  были получены как с помощью стандартного оборудования PPSM-14 (г. Прага, Чехия), так и с помощью спроектированного и изготовленного в лаборатории сильных магнитных полей (г. Дрезден, Германия) магнитометра [27]. Таким образом, измерения проводились как в статических (до 140 кЭ), так и в импульсных (до 600 кЭ) полях при температуре 4.2 К. Полученные экспериментальные данные сравнивались и корректировались между собой. При проведении расчетов межподрешеточного R—Fe обменного взаимодействия использовали несколько методов и подходов, подробное описание которых непосредственно для исходных соединений  $\text{HoFe}_{11}\text{Ti}$  и  $\text{ErFe}_{11}\text{Ti}$  можно найти в работе [22].

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### 2.1. $\text{HoFe}_{11}\text{Ti}$ и его нитрид $\text{HoFe}_{11}\text{TiN}$

На рис. 1 представлены полевые зависимости намагниченности для нитрида  $\text{HoFe}_{11}\text{TiN}$ , измеренные вдоль оси [001] (которая является осью легкого намагничивания (ОЛН)) и перпендикулярно ей [24]. На вставке к рис. 1 представлены кривые  $M(H)$  для монокристалла  $\text{HoFe}_{11}\text{Ti}$ , полученные для трех кристаллографических направлений, а именно [001], [100], [110]. Проведем сравнительный анализ кривых намагничивания для соединений  $\text{HoFe}_{11}\text{Ti}$  и  $\text{HoFe}_{11}\text{TiN}$ , измеренные вдоль ОЛН, как наиболее информативные. В исходном соединении  $\text{HoFe}_{11}\text{Ti}$  на кривой намагничивания вдоль оси [001] наблюдается скачок намагниченности (критическое поле перехода  $H_{CR}$  около 450 кЭ). При азотировании происходит смена типа магнитной анизотропии

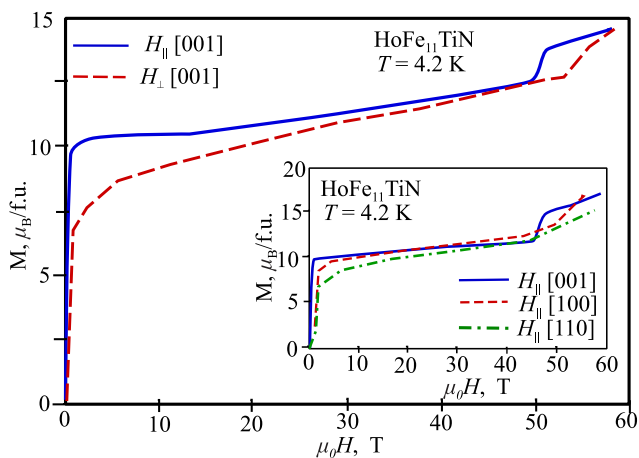


Рис. 1. Полевые зависимости намагниченности для нитрида  $\text{HoFe}_{11}\text{TiN}$ , измеренные вдоль оси [001] и перпендикулярно ей. На вставке к рисунку —  $M(H)$  для монокристалла  $\text{HoFe}_{11}\text{Ti}$ , измеренные вдоль осей [001], [100], [110]

с одноосной на конус ОЛН (или легкий конус), однако ось [001] остается наилегчайшей (аналогичная ситуация наблюдается и в других R—Fe интерметаллидах [28, 29]). Скачок намагниченности сдвигается в сторону более сильных магнитных полей и наблюдается около 500 кЭ. При приложении магнитного поля в направлении, перпендикулярном [001], в азотированном образце также наблюдается скачок намагниченности. В то же самое время в исходном образце  $\text{HoFe}_{11}\text{Ti}$  скачок  $M(H)$  на оси [110] отсутствует, но наблюдается на оси [100]. Из рис. 1 видно, что используемых в эксперименте внешних магнитных полей не хватает для достижения ферромагнитного состояния как в исходном соединении, так и в нитриде [30, 31].

Как уже упоминалось выше, существует несколько методов оценки межподрешеточного обменного взаимодействия. Один из них производит анализ величины скачка намагниченности и поля, при котором он наблюдается. Подробно с этим методом можно ознакомиться в работе [32], где рассматривалось поведение намагниченности гексагонального магнетика  $\text{Er}_2\text{Fe}_{17}$ . Позднее метод был адаптирован для тетрагональных магнетиков, в частности для системы с водородом  $\text{Er}_2\text{Fe}_{14}\text{V—H}$  [33]. В работе Скурского с соавт. [22] метод уже был применен непосредственно к соединению  $\text{HoFe}_{11}\text{Ti}$ . Итак, с помощью этого метода можно определить молекулярное поле ( $H_{\text{mol}}$ ), действующее со стороны железной подрешетки на подрешетку гольмия для нитрида  $\text{HoFe}_{11}\text{TiN}$  по формуле

$$H_{\text{mol}} = H_1/h_1, \quad (1)$$

где  $H_1$  — величина первого критического поля ( $H_{CR} = 450$  кЭ), которое определяется из эксперимента ([32, рис. 6]). Для расчета  $h_1$  в случае тетрагонального магнетика может быть использована следующая формула:

$$h_1 = h_{C1}(m) + \Delta\sigma \left[ \frac{1-m}{1-m/2} - h_{C1}(m) \right] \frac{1-m+m^2/2}{m(1-m/2)}, \quad (2)$$

где  $\Delta\sigma_1$  — величина скачка намагниченности, которая также определяется из эксперимента,  $m$  — отношение намагниченностей подрешеток железа и редкой земли ( $m = M_{\text{Fe}}/M_{\text{R}}$ ),  $h_{C1}$  — ордината трикритической точки ([32, уравнение (A8)]). В предположении, что намагниченность подрешетки железа в исходном образце  $\text{HoFe}_{11}\text{Ti}$  и его нитриде совпадает с намагниченностью соединений  $\text{YFe}_{11}\text{Ti}$  и его нитрида, значения  $M_{\text{Fe}}$  были взяты 19.4 и 21.8  $\mu_B$  соответственно. В работе [22] молекулярное поле  $H_{\text{mol}}$  в исходном соединении  $\text{HoFe}_{11}\text{Ti}$ , действующее со стороны подрешетки железа на ионы  $\text{Ho}^{3+}$ , было оценено как 750 кЭ. Для нитрида  $\text{HoFe}_{11}\text{TiN}$ , при использовании формул (1), (2) и значения первого критического поля  $H_{\text{CR}} = 500$  кЭ, нами было получено значение  $H_{\text{mol}} = 780$  кЭ. Таким образом, было обнаружено усиление межподрешеточного обменного взаимодействия в нитриде  $\text{HoFe}_{11}\text{TiN}$ .

### 2.2. $\text{ErFe}_{11}\text{Ti}$ и его нитрид $\text{ErFe}_{11}\text{TiN}$

На рис. 2 представлены полевые зависимости намагниченности для нитрида  $\text{ErFe}_{11}\text{TiN}$ , измеренные вдоль оси [001] и перпендикулярно ей [24]. На вставке к рис. 2 представлены кривые  $M(H)$  для монокристалла  $\text{ErFe}_{11}\text{Ti}$ , полученные для трех кристаллографических направлений, а именно [001], [100], [110]. В исходном соединении  $\text{ErFe}_{11}\text{Ti}$  тип магнитокристаллической анизотропии — легкий конус, так как мы наблюдаем проекции вектора намагниченности вдоль всех трех кристаллографических осей [100], [110] и [001]. На кривой намагничивания вдоль оси [001] начало процесса вращения магнитных моментов подрешеток может иметь место в поле 360 кЭ, о чем свидетельствует перегиб на кривой и начало плавного роста намагниченности. Затем при критическом поле 560 кЭ происходит скачок намагниченности. Для сравнения отметим, что в гидриде  $\text{ErFe}_{11}\text{TiH}$  не наблюдается перегиба и плавного увеличения намагниченности в области полей от 300 до 500 кЭ [23]. Здесь присутствует только резкий скачок при 540 кЭ. В нитриде  $\text{ErFe}_{11}\text{TiN}$  перегиб вновь наблюдается в том же поле 360 кЭ, в то время как скачок намагниченности наблюдается в более высоком поле — около 580 кЭ.

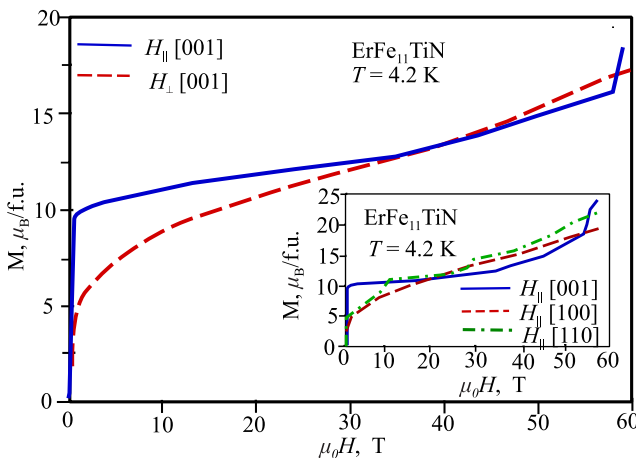


Рис. 2. Полевые зависимости намагниченности для нитрида  $\text{ErFe}_{11}\text{TiN}$ , измеренные вдоль оси [001] и перпендикулярно ей. На вставке к рисунку —  $M(H)$  для монокристалла  $\text{ErFe}_{11}\text{Ti}$ , измеренные вдоль осей [001], [100], [110]

Как показано в статье [22], для исходного соединения с эрбием  $\text{ErFe}_{11}\text{Ti}$  может быть применен другой метод оценки межподрешеточного обменного взаимодействия, а именно метод ортогональной точки (молекулярное поле определяется как абсцисса середины скачка на экспериментальной кривой намагничивания  $M(H)$ , подробное описание дано в той же работе). Для исходного соединения этот метод дает значение  $H_{\text{mol}} = 600$  кЭ (экспериментальная ошибка составляет  $\pm 20$  кЭ). Это же значение было получено в работе [34] при проведении полного анализа всех параметров, включая параметры кристаллического поля. В случае гидрида межподрешеточное обменное взаимодействие несколько снижается, оставаясь в пределах экспериментальной ошибки  $H_{\text{mol}} = 588$  кЭ. В то же самое время для нитрида нами было получено значение  $H_{\text{mol}} = 630$  кЭ, которое подтвердило усиление межподрешеточного обмена для азотированных соединений  $\text{RFe}_{11}\text{TiN}$  в случае, когда  $R = \text{Ho}$  или  $\text{Er}$ .

При введении легких элементов внедрения (азота, водорода и др.) в составы  $\text{RFe}_{11}\text{Ti}$  имеет место значительное по величине объемное расширение решетки [12, 21, 35, 36]. Объемный эффект приводит к увеличению расстояний между магнитактивными ионами редкой земли и железа, а это означает, что обменные взаимодействия ( $R\text{—Fe}$ ) должны уменьшаться. Однако при расширении решетки увеличиваются и расстояния в парах  $\text{Fe—Fe}$ , в результате которого магнитный момент на атомах  $\text{Fe}$  возрастает вследствие усиления его локализации из-за уменьшения перекрытия зон. Магнитные моменты атомов железа в структуре  $\text{ThMn}_{12}$  относительно невелики. Средний магнитный момент для  $\text{LuFe}_{11}\text{Ti}$  составляет  $\mu_{\text{Fe}} = 1.77 \mu_B/\text{Fe}$  (к примеру, у чистого железа  $\mu_{\text{Fe}} = 2.2 \mu_B/\text{Fe}$ ). При этом для позиций  $8i$ ,  $8j$ ,  $8f$  значения магнитных моментов, локализованных на атомах  $\text{Fe}$ , составляют 1.99, 1.76, 1.51 (в единицах  $\mu_B$ ) соответственно. Согласно известным литературным данным, при азотировании происходит увеличение магнитных моментов во всех позициях  $8i$ ,  $8j$ ,  $8f$  (вследствие сужения  $3d$ -зоны в результате объемного расширения), что ведет к суммарному росту намагниченности подрешетки  $\text{Fe}$ , который и наблюдается на опыте [9, 26].

Таким образом, основным фактором, приводящим к возрастанию межподрешеточных обменных взаимодействий при азотировании, можно считать именно усиление намагниченности подрешетки железа вследствие расширения элементарной ячейки на 3 % из-за внедрения атомов азота в октаэдрические междоузлия.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено сравнительное исследование магнитных свойств исходных  $\text{RFe}_{11}\text{Ti}$  и азотированных образцов  $\text{RFe}_{11}\text{TiN}$ , где  $R = \text{Ho}$  и  $\text{Er}$ . Установлено, что, в отличие от гидридов  $\text{RFe}_{11}\text{TiH}$ , в которых происходит небольшое ослабление межподрешеточных обменных взаимодействий, в нитридах, наоборот, имеет место усиление этих взаимодействий. Основная причина такого различия состоит

в том, что при введении одного атома азота (на формульную единицу) в кристаллическую решетку соединений  $RFe_{11}Ti$  увеличение объема достигает 3% (при введении одного атома водорода — только 1%). Более того, атомы азота сохраняют жесткие  $2p$ -орбитали в металлах, которые слабо деформируются кристаллической решеткой, так как  $p$ -электрон достаточно сильно связан с анионом N, в то время как при гидрировании водород создает электронные состояния с низкой энергией, в которые достаточно легко переходят электроны из  $3d$ -зоны [37, 38]. Как следствие — увеличение намагниченности подрешетки железа в нитридах превосходит увеличение магнитных моментов на атомах Fe в гидридах. Усиление подрешетки железа в  $RFe_{11}TiN$  и приводит к усилению молекулярного поля, действующего на редкоземельную подрешетку.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 18-13-00135). Автор благодарит И. А. Пелевина и Дж. Лоу за получение высокополевых данных по намагниченности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tereshina I. S., Kostyuchenko N. V., Tereshina-Chitrova E. A. et al. // *Sci. Rep.* 2018. **8**. P. 3595.
2. Körner W., Krugel G., Elsässer Ch. // *Sci. Rep.* 2016. **6**. 24686.
3. Hirayama Y., Takahashi Y., Hirosawa S., Hono K. // *Scripta Materialia*. 2017. **138**. P. 62.
4. Gabay A. M., Cabassi R., Fabbrici S. et al. // *J. Alloys Compd.* 2016. **683**. P. 271.
5. Bodriakov V. Yu., Ivanova T. I., Nikitin S. A., Tereshina I. S. // *J. Alloys Compd.* 1997. **259**. P. 265.
6. Suski W. // The  $ThMn_{12}$ -Type compounds of rare earths and actinides: Structure, magnetic and related properties / in Handbook on the physics and chemistry of rare earths. K. A. Gschneidner, L. Eyring (Eds). Amsterdam: Elsevier. 1996. **22**. P. 143.
7. Nikitin S. A., Tereshina I. S., Pankratov N. Yu., Skourski Yu. V. // *Phys. Rev. B.* 2001. **63**. 134420(4).
8. Nikitin S. A., Tereshina I. S., Verbetsky V. N. et al. // *J. Alloys Compd.* 2001. **322**. P. 42.
9. Fujii H., Sun H. // Interstitial modified intermetallics of rare earth 3d elements / in Handbook of of Magnetic Materials. K. H. J. Buschow (Eds.). Amsterdam: North Holland. 1995. **9**. P. 304.
10. Harashima Y., Terakura K., Kino H. et al. // *Phys. Rev. B.* 2015. **92**. 184426.
11. Zhang X., Cheng B., Yang Y. // *Appl. Phys. Lett.* 2000. **77**. P. 4022.
12. Никитин С. А., Терешина И. С. // Физика твердого тела. 2003. **45**. С. 1850. (Nikitin S. A., Tereshina I. S. // *Physics of the Solid State*. 2003. **45**. N 10. P. 1944.)
13. Tereshina E. A., Andreev A. V. // *Intermetallics*. 2010. **18**, N 6. P. 1205.
14. Duc N. H. // Intersublattice exchange coupling in the lanthanide-transition metal intermetallics / in Handbook on Physics and Chemistry of Rare Earths. K. A. Gschneidner, L. Eyring (Eds). Amsterdam: Elsevier. 1997. **24**. P. 177.
15. Nikitin S., Tereshina I., Tereshina E. et al. // *J. Alloys Compd.* 2008. **451**. P. 477.
16. Tereshina E. A., Andreev A. V., Kamarad J., Drulis H. // *J. Alloys Compd.* 2010. **492**. P. 1.
17. Yang J., Dong Sh., Mao W. et al. // *Physica B: Condensed Matter*. 1995. **205**. P. 341.
18. Tereshina E., Telegina I., Palewski T. et al. // *J. Alloys Compd.* 2005. **404**. P. 208.
19. Tereshina I. S., Nikitin S. A., Pankratov N. Yu. et al. // *J. Magn. Magn. Mater.* 2001. **231**. P. 213.
20. Tereshina I. S., Gaczynski P., Rusakov V. S. et al. // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2001. **13**. P. 8161.
21. Nikitin S. A., Tereshina I. S., Verbetsky V. N., Salamova A. A. // *J. Alloys Compd.* 2001. **316**. P. 46.
22. Skourski Y., Bartolomé J., Kuz'min M. D. et al. // *J. Low Temp. Phys.* 2013. **170**. P. 307.
23. Kostyuchenko N. V., Zvezdin A. K., Tereshina E. A. et al. // *Phys. Rev. B.* 2015. **92**. 04423.
24. Пелевин И. А. Влияние элементов внедрения на структуру и магнитные свойства редкоземельных соединений с высоким содержанием железа. Дисс. ... к.ф.-м.н. Москва, 2017. 131 с. (Pelevin I. A. The effect of interstitial elements on the structure and magnetic properties of rare earth compounds with a high iron content. Dissertation (phys.-math.). Moscow, 2017. 131 p.)
25. Liu J. P., de Boer F. R., de Châtel P. F. et al. // *J. Magn. Magn. Mater.* 1994. **132**. P. 159.
26. Терешина И. С., Безкоровая Г. А., Панкратов Н. Ю. и др. // ФТТ. 2003. **45**. С. 101. (Tereshina I. S., Beskorovainaya G. A., Pankratov N. Yu. et al. // *Physics of the Solid State*. 2003. **45**. P. 104.)
27. Zherlitsyn S., Wustmann B., Herrmannsdürfer T., Wosnitza J. // *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2012. **22**. 4300603.
28. Tereshina E. A., Drulis H., Skourski Yu., Tereshina I. // *Phys. Rev. B.* 2013. **87**. 214425.
29. Tereshina I. S., Tereshina-Chitrova E. A., Pelevin I. A. et al. // *J. Low Temp. Phys.* 2018. **190**. P. 236.
30. Tereshina E. A., Kuz'min M. D., Skourski Yu. et al. // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2017. **29**. 24LT01(6).
31. Tereshina I. S., Ivanov L. A., Tereshina-Chitrova E. A. et al. // *Intermetallics*. 2019. **112**. 106546.
32. Kuz'min M. D., Skourski Y., Skokov K. P., Müller K.-H. // *Phys. Rev. B.* 2007. **75**. 184439.
33. Tereshina E. A., Tereshina I. S., Kuz'min M. D., Skourski Y. et al. // *J. Appl. Phys.* 2012. **111**. 093923.
34. Kostyuchenko N. V., Pelevin I. A., Tereshina I. S. et al. // Proceedings of 24th International Workshop on Rare-Earth Magnets and Their Applications. 2016. TU Darmstadt, Germany. P. 275.
35. Piquer C., Grandjean F., Isnard O. et al. // *J. Phys.: Condens. Matter*. 2006. **18**. P. 221.
36. Pankratov N. Yu., Nikitin S. A., Iwasieczko W. et al. // *J. Alloys Compd.* 2005. **404**. P. 181.
37. Tereshina E. A., Yoshida H., Andreev A. V. et al. // J. of the Physical Society of Japan. 2007. **76**. Suppl. A. P. 82.
38. Tereshina I. S., Nikitin S. A., Suski W. et al. // *J. Alloys Compd.* 2005. **404–406**. P. 172.

**Strengthening the Intersublattice Exchange Interaction  
in  $R(\text{Fe,Ti})_{12}\text{N}$  ( $R = \text{Ho}$  and  $\text{Er}$ ) Nitrides****I. S. Tereshina***Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.**E-mail: [irina\\_tereshina@mail.ru](mailto:irina_tereshina@mail.ru); [tereshina@physics.msu.ru](mailto:tereshina@physics.msu.ru).*

The field dependences of the magnetization of nitrogen-containing compounds  $R(\text{Fe,Ti})_{12}$  ( $R = \text{Ho}$  and  $\text{Er}$ ) are analyzed. It was found that the initial  $\text{HoFe}_{11}\text{Ti}$  sample at  $T = 4.2$  K exhibits the easy-axis anisotropy; however, as a result of nitriding, the anisotropy type changes to the easy cone of magnetization. As in the original samples of  $\text{HoFe}_{11}\text{Ti}$  and  $\text{ErFe}_{11}\text{Ti}$ , in  $\text{HoFe}_{11}\text{TiN}$  and  $\text{ErFe}_{11}\text{TiN}$  nitrides the cascade of spin-reorientation phase transitions is observed which is induced by external magnetic field. In the framework of the molecular field theory, the effect of nitriding on the interlattice exchange interactions is estimated. It is established that the molecular field that acts from the iron sublattice on rare-earth ions (holmium and erbium) is enhanced. The effect of nitriding and hydrogenation on the intersublattice exchange is compared.

*Keywords:* intermetallic compounds, nitrides, magnetization, exchange interactions.

PACS: 75.50.Bb, 75.30.Et, 75.50.Gg.

*Received 14 February 2020.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin. 2020. 75, No. 3. Pp. 237–241.*

**Сведения об авторе**

Терёшина Ирина Семёновна — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-42-43, e-mail: [irina\\_tereshina@mail.ru](mailto:irina_tereshina@mail.ru), [tereshina@physics.msu.ru](mailto:tereshina@physics.msu.ru).