

Применение редкоземельных элементов в технических изделиях

Петр Витязь,
начальник Управления
аэрокосмической деятельности
аппарата НАН Беларуси,
академик

Валерий Федосюк,
генеральный директор НПЦ
НАН Беларуси
по материаловедению,
член-корреспондент

Игорь Макоед,
доцент кафедры общей
и теоретической физики физико-
математического факультета
Брестского государственного
университета им. А.С. Пушкина,
кандидат физико-
математических наук

Казимир Янушкевич,
главный научный сотрудник
лаборатории физики магнитных
материалов НПЦ НАН Беларуси
по материаловедению, доктор
физико-математических наук



Материаловедение базируется на синтезе новых соединений, сплавов, композитов и реализации их в технологических процессах и технических устройствах – в микроэлектронике, сложных оптоэлектронных системах и т.д. Так сложилось, что из-за большой востребованности и соответствующей финансовой поддержки основное использование редкоземельных элементов (РЗЭ) первоначально пришло в промышленность и технику военного назначения. Редкоземельные металлы (РЗМ) нашли широкое применение в важнейших отраслях по производству таких промежуточных товаров, как постоянные магниты, люминофоры, стекло, кислородные сенсоры, батареи и нефтяные катализаторы.



В авиации и космонавтике РЗМ необходимы при изготовлении корпусов планеров, авиационных двигателей, генераторов и электроприводов, сенсорных датчиков, электроприводов оперения стабилизаторов, систем контроля гравитации, радиолокационных ловушек, мультиспектральных систем наведения, радиочастотных, микроволновых и антенных систем [1–5]. В свою очередь продукция военной и аэрокосмической промышленности служит своеобразным переходным этапом к производству изделий гражданского назначения: потребительской электроники, автомобилей, оптического оборудования, оптоволокон, новых систем экономного эффективного освещения, включая светодиодные панели и лампы, компактные флуоресцентные лампы, а также для расширения номенклатуры топливной продукции нефтепереработки.

Цель данной работы – обобщение сведений о применении РЗЭ в технических устройствах, выявление фундаментальных задач, решение которых способно интенсифицировать использование РЗМ в сфере микроэлектроники нового поколения.

Основные качества РЗМ, обеспечивающие практическое применение

Особенности при заполнении электронных оболочек атомов, различие величин атомных и ионных радиусов, плотности, эффективных магнитных моментов, электропроводящих свойств, а в итоге физических и химических фундаментальных характеристик привело к разделению РЗЭ на легкие

и тяжелые. К первой группе относят лантан, церий, празеодим, неодим, прометий, самарий, европий и гадолиний. Ко второй – тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций, скандий, иттрий [6–8]. Наименьшую температуру плавления имеет церий – 797 °С, а наивысшую – лютеций: 1652 °С. Самый активный металл – лантан. Его приходится хранить под слоем парафина, так как на открытом воздухе он мгновенно образует оксид. РЗЭ хорошо реагируют со всеми галогенами с формированием трехатомных соединений. Их гидроксиды очень плохо растворимы в воде, при этом соли РЗМ отлично растворяются в кислотах.

Все 17 элементов, относящиеся к редкоземельным, фундаментально различаются по своим механическим, магнитным и химическим свойствам. Это обеспечивает заметное изменение характеристик основной матрицы и появление новых ценных качеств при допировании ими различных веществ (*табл. 1*). Возможность улучшать известные материалы путем добавок в виде окислов и металлов РЗЭ усиливает конкуренцию по их добыче и применению [9].

В военном деле компоненты, содержащие РЗЭ, используются также при изготовлении взрывчатых веществ.

Редкоземельные элементы в технических изделиях

Изменение свойств материалов при допировании металлами редких земель создало условия для разработки уникального оборудования и устройств военного назначения [3, 10–12].

Магниты «ниодим-железо-бор» (Nd-Fe-B) используются в электродвигателях и генераторах,

РЗЭ	Влияние на свойства материалов при допировании
СКАНДИЙ	Тугоплавкий, повышает прочность материалов, усиливает свечение
ИТТРИЙ	Усиливает жаропрочность и долговечность материалов, улучшает качество свечения
ЛАНТАН	Ускоряет крекинг нефти, повышает пластичность, жаропрочность и химическую устойчивость материалов
ЦЕРИЙ	Повышает электропроводность и пластичность металлов при небольших количествах добавок, придает розоватый оттенок стеклу, хороший катализатор
ПРАЗЕОДИМ	Совершенствует свойства сверхпроводников и сплавов, придает бледно-зеленый оттенок стеклу, используется в лазерах и для получения пигментов
НЕОДИМ	Способствует хорошему качеству стекла и сплавов, растворяет плутоний, повышает контрастность изображения, применяется в магнитах, лазерах и излучателях
ПРОМЕТИЙ	Способен к люминесценции, используется в атомных батарейках, стержнях реакторов, для ионизации воздуха
САМАРИЙ	Улучшает свойства стержней для ядерных реакторов, магнитов, поглощающего инфракрасные лучи стекла, огнеупорность материалов
ЕВРОПИЙ	Повышает качество микрочипов, карт памяти, сверхпроводников, сплавов и керамики
ГАДОЛИНИЙ	Придает сильные парамагнитные свойства для получения сверхнизких температур, используется в полупроводниках и рентгеновских аппаратах
ТЕРБИЙ	Необходим для сверхмощных магнитов и излучателей ультразвука, катализатор реакций окисления
ДИСПРОЗИЙ	Повышает пластичность и магнитные свойства материалов, катализатор в нефтехимии, используется для получения красных люминофоров
ГОЛЬМИЙ	Наделяет магниты сверхпроводящими свойствами, применяется в лазерах, активирует люминофоры
ЭРБИЙ	Укрепляет оптоволокно, магнитные сплавы, стекло, специальную керамику
ТУЛИЙ	Применяется в лазерах, магнитных носителях, для дефектоскопии, в диагностических приборах
ИТТЕРБИЙ	Улучшает термоэлектрические и магнитные свойства материалов, обеспечивает весовую легкость полупроводников
ЛЮТЕЦИЙ	Повышает мощность магнитов, сверхпроводимость, жаропрочность

Таблица 1. Влияние на качество и свойства вещества матрицы при допировании ее редкоземельными элементами

в мощных динамиках и других компонентах аудиосистем (кассеты, жесткие диски, CD/DVD диски), применяемых для ведения психологических войн. Например, в темное время суток была проведена имитация высадки десанта, сопровождающаяся звуками из мощных динамиков, установленных на плотках, которые имитировали шум кораблей, танков, вертолетов и голоса, а настоящий десант высадился в нескольких милях от данного места. Nd-Fe-B и самарий-кобальтовые магниты, а также тербий-железоникелевый сплав с диспрозием (Терфенол-Д) задействованы в технологии «стелс» в вертолетах с тем, чтобы создать белый шум, заглушающий звуки от движения лопастей несущего винта.

В американской многоцелевой высокоточной дозвуковой крылатой ракете большой дальности BGM-109 «Томагавк» система наведения соединена

со стабилизаторами полета, которые направляются приводами с редкоземельными магнитами.

Постоянные магниты «неодим-железо-бор» есть в компьютерах, применяемых во многих системах вооружений. Специально спроектированные для нейтрализации вибрации, толчков и силы притяжения, управляемые компьютером моторы и приводы с редкоземельными металлами устанавливаются в самолетах, танках, ракетных системах, командных и контрольных центрах.

Также редкоземельные магниты встречаются в волноводах ламп бегущей волны (ЛБВ) и клистронов, генерирующих и усиливающих микроволны. В оборонной сфере они необходимы в спутниковой и тропосферной связи, в усилителях постоянного тока и радарных импульсных, в каналах связи. Для фокусировки пучка электронов в широкополосных спиральных ЛБВ

используются периодические постоянные редкоземельные магниты, в то время как в узкополосных клистродах и при более высоких энергиях – непериодические. Редкоземельные высокочастотные лазеры присутствуют в радиорелейных каналах связи в спутниковых и наземных системах. Они позволяют быстрее и в более широком диапазоне передавать данные, чем традиционные микроволновые передатчики.

Эрбиевое волокно и волоконно-оптические усилители применяются в высокопроизводительных оптоволоконных системах, преимущество которых становится способностью передачи больших объемов цифровой информации на значительные расстояния без ретрансляторов или усилителей сигнала, а также широкий диапазон рабочих температур, устойчивость к межканальным переключениям, защищенность от внешнего вмешательства и электронного перехвата.

Самарий-кобальтовые постоянные магниты есть в генераторах, которые подают электричество в электросистемы самолетов. Небольшие, но мощные приводы на редкоземельных металлах используются для механизации крыла, в закрылках, руле, элеронах.

Цирконий, стабилизированный оксидом иттрия, – высокотемпературное защитное керамическое покрытие, которое обеспечивает термический барьер для защиты металлических сплавов от нагреваемых частей авиадвигателей. Оксид иттрия предохраняет цирконий от смены тетрагональной структуры на моноклинную, что приводило бы к ухудшению устойчивости керамики к высоким температурам и напряжению.

Цветные телевизоры и компьютерные мониторы – ключевой элемент во многих системах управления оборонного назначения, призванных быстро отображать и передавать информацию, особенно в авионике и системах усиления видимости. Редкоземельные металлы использовались в цветных катодно-лучевых трубках (КЛТ) в качестве фосфора с начала 1960-х гг., европий-иттриевые компоненты – в виде красного (свободного) фосфора в КЛТ-экранах из-за того, что пик их спектра излучения приходится на видимую область (611 нм). Цветные SuperVGA-мониторы обычно применяются от среднего до короткого послесвечения. Это позволяет быстро сменить изображения и избежать появления бликов. Оксид церия нужен как добавка в стекле КЛТ, чтобы устранить эффект его потемнения под действием электронного пучка и как элемент поли-

ровочного вещества для КЛТ-экранов. В современных плоских панельных дисплеях компьютеров, авионики и систем управления вооружениями внедрены жидкокристаллические мониторы (LCD). Плоскопанельные дисплеи (FPD) обычно используют твист-нематическую тонкопленную транзисторную (TFT) LCD-технологию либо плазменные дисплейные панели (PDP). Все плоские панельные дисплеи имеют стеклянные поверхности или основы, которые полируются оксидом церия. Дисплеям в авионике для большего свечения необходим фосфор с добавлением оксисульфидов гадолиния или лантана с присадкой тербия. Эти редкоземельные авиационные фосфоры вызывают желто-зеленое свечение, спектр которого 542 и 545 нм соответственно.

РЗМ имеют ряд применений в радарных системах. Редкоземельные постоянные магниты, обычно самарий-кобальтовые, используются в радарных лампах бегущей волны (ЛБВ) для фокусировки энергии микроволн. Железо-иттриевый гранат (YIG) или гадолиний-иттриевый гранат (YGG) – в переключателях фаз, тьюнерах и фильтрах.

Лазеры Nd: YAG (алюмо-иттриевый гранат с добавками неодима) задействованы в качестве указателей целей, дальномеров и систем обнаружения. Например, компьютерный лазерный прицел на танках «Абрамс M1A1/2» включает дальномер компании «Raytheon», а также систему лазерного наведения для высокоточного первого выстрела. Редкоземельные лазерные системы служат как для обнаружения противника, так и для постановки помех, подводного сканирования и т.д.

Гадолиний-иттриевый гранат (YGG) используется в тороидах в антенне радиолокатора «Патриот» и в радиочастотных циркуляторах радара и ракеты, которые путем магнитной фокусировки управляют потоком электронных сигналов. Самарий-кобальтовые постоянные магниты применяются для фокусировки пучка электронов в магнетронных трубках радара (в наземных системах управления воздушным движением и наблюдения, поисковых радарах, для предотвращения столкновений и в качестве навигационной помощи в самолетах и т.д.).

Гадолиний, выступающий в качестве красителя и покрытий разной толщины, нужен для защиты от нейтронного излучения, поскольку имеет наибольшее эффективное сечение захвата среди известных

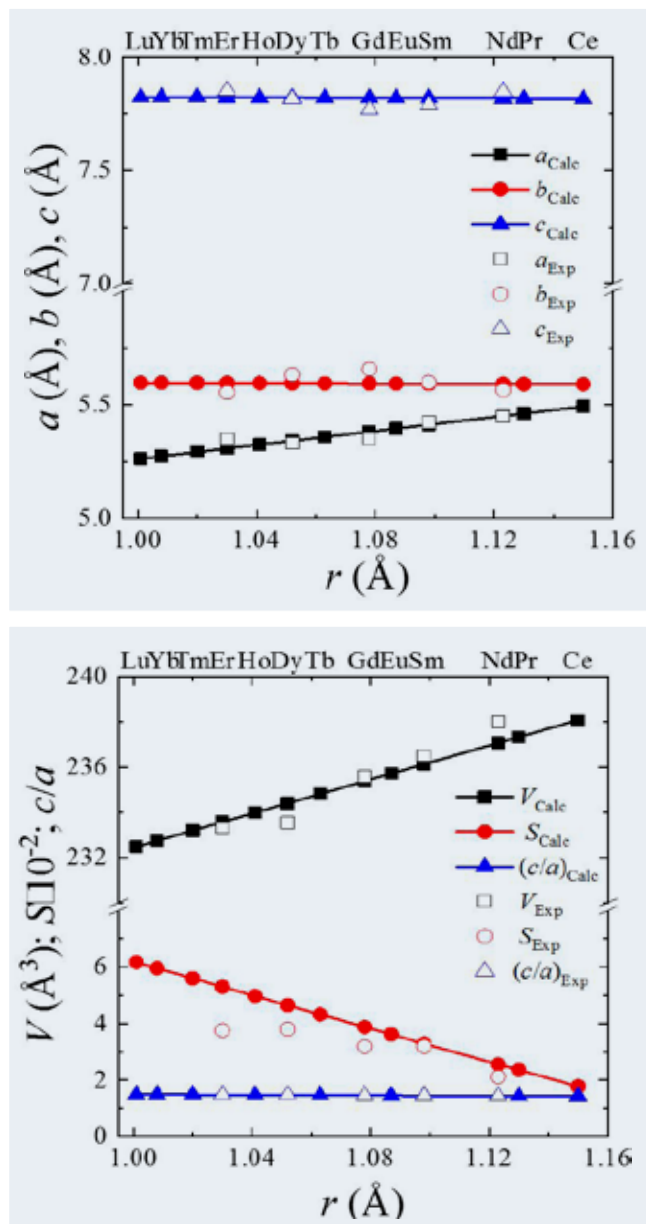


Рис. 1. Зависимости изменения параметров элементарных кристаллических ячеек, осевого соотношения и объема от ионного радиуса РЗЭ на примере составов $La_{0,50}R_{0,50}FeO_3$ (R=Ce-Lu) [16, 17]

элементов, необходимое для поглощения нейтронов конкретных энергий в блоках защиты.

Редкоземельные металлы, включая гадолиний, иттрий и самарий, используются в нескольких типах оборудования для радиоэлектронной борьбы (РЭБ), включая функцию обнаружения преследования TWF – защитную систему, применяющую импульсный радар Доплера для обнаружения ракет, приближающихся к самолетам

сзади, и предпринимающую ответные меры для нейтрализации атаки методами РЭБ. Интерактивное РЭБ-оборудование позволяет создавать помехи, поглощать, перенаправлять или искажать радиосигнал противника таким образом, что он становится зашифрованным или бесполезным.

Компоненты на основе церия выступают полирующим средством для различных типов оптических линз военного назначения. Многие из них также содержат оксид лантана для повышения лучепреломления и снижения дисперсии. Линзы используются для замера дальности, систем обнаружения, создания помех, фотографирования и защиты от вредных лазерных излучений, ослеплений, ультрафиолетовых или отраженных лучей. Оптика с содержанием редкоземельных металлов задействована в биноклях, лазерных прицелах, телескопах, микроскопах, защитных очках, дальномерах, приборах ночного видения, линзах камер, фильтрах и защитных линзах.

Сплав редкоземельных металлов Терфенол-Д заменяет пьезокерамические материалы в таких устройствах, как высокомогущные гидролокаторы на кораблях и подводных лодках. Он реагирует на магнитное поле в 200 раз быстрее, чем механическое устройство. Недавно его также начали использовать как инжектор дизельного топлива, позволяющий мгновенно подстраивать размер для впрыска необходимого количества горючего.

В свою очередь акустическая энергия Терфенол-Д вырабатывается за счет распространения и сужения особо настроенных акустических элементов, выдающих волны высокого давления. В нефтяной промышленности данное свойство применяется в скважинных приборах для увеличения подачи нефти.

Ультразвуковые устройства с включением редкоземельных металлов способны вызывать колебания в частотном диапазоне 16 kHz-1 GHz, которые не могут быть услышаны человеком. Они нужны в звуковой химии, при ультразвуковой сварке, переработке отходов, в медицинском оборудовании, для дезинфекции и т.д.

Предприятия и научные коллективы, работающие с РЗЭ в Республике Беларусь

Со времен СССР страна имеет достаточно разветвленную сеть предприятий, лабораторий и научных коллективов, решающих задачи микро-

электроники и оборонной промышленности. Среди них Национальная академия наук Беларуси (создание приборов микроэлектроники и лазеров), завод им. Вавилова (дальномеры и прицелы с РЗЭ), «Приборостроительный завод Оптрон» (оборудование для химической промышленности и приборостроения), «Планар» (интегральные платы на основе матриц, содержащих РЗЭ), предприятие «Феррит» (изготовление постоянных магнитов $Nd_2Fe_{14}B$ и $SmCo_5$ для сепараторов), лаборатории магнитных пленок, магнитных материалов, электронной и тугоплавкой керамики, наноматериалов НППЦ НАН Беларуси по материаловедению (синтез новых составов магнитных полупроводников, ферритов гранатов и мультиферроиков с РЗЭ для микроэлектроники). Для подготовки профильных специалистов составлены учебные программы ряда высших учебных заведений: БГУ, БГПУ им. М. Танка, БрГУ им. А.С. Пушкина, БГУИР, БНТУ, БрГТУ, ВГТУ. Разработкой магнитных и полупроводниковых датчиков нового поколения занят Институт технической акустики НАН Беларуси, контролем качества оптических изделий с РЗЭ для приборостроения и при разработке лазерных систем – Институт физики НАН Беларуси им. Б.И. Степанова. Для всех исследовательских центров Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 г. №156 утверждены единые приоритеты научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 гг., которые успешно реализуются при выполнении научных программ, в том числе Союзного государства [13].

Перспективные направления синтеза новых составов, содержащих РЗЭ

Эксперимент, выполненный сотрудниками лаборатории магнитных материалов НППЦ НАН Беларуси по материаловедению совместно с учеными Брестского педагогического университета, показал, что допирование РЗЭ известных и уже применяемых в микроэлектронике соединений и сплавов позволяет плавно изменять величину их кристаллических характеристик [14–16]. Данный факт говорит о возможности целенаправленно влиять на величины магнитных и электрических параметров, изменяя состав и концентрацию содержания РЗЭ в веществе основной матрицы. В итоге это позволит вносить изменения в быстродействие при управлении рабочими диапазонами приборов и командными устройствами. Эксперимент и расчеты показали, что допирование известных мультиферроиков на основе феррита висмута и ортоферритов $La_{0,50}R_{0,50}FeO_3$ элементами редких земель от церия до лютеция ($R=Ce-Lu$) в небольших количествах обеспечивает постепенное изменение их кристаллических и магнитных качеств. Поскольку эти материалы нашли практическое применение в составе твердотопливных элементов, газовых сенсоров, каталитических нейтрализаторов, быстродействующих переключателей, то изучение их свойств, несомненно, актуально. Установлено, что замещения РЗЭ в катионной подрешетке в составе ферритов позволяют плавно изменять величину основных параметров

СОСТАВ	$\rho(x/cm^3)$	СТРУКТУРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ			
		$a(\text{Å})$	$b(\text{Å})$	$c(\text{Å})$	$V(\text{Å}^3)$
$La_{0,5}Er_{0,5}FeO_3$	7,32379	5,3496	5,5543	7,8525	233,32
$La_{0,5}Dy_{0,5}FeO_3$	7,20649	5,3306	5,6338	7,8163	234,74
$La_{0,5}Gd_{0,5}FeO_3$	7,11687	5,3529	5,6575	7,7680	235,25
$La_{0,5}Eu_{0,5}FeO_3$	7,04898	5,3883	5,6283	7,7777	236,04
$La_{0,5}Sm_{0,5}FeO_3$	6,98110	5,4238	5,5992	7,7875	236,50
$La_{0,5}Nd_{0,5}FeO_3$	6,85167	5,4494	5,5655	7,8481	238,02

Таблица 2. Значения величин плотности, определенной по результатам рентгеновских исследований, параметры решетки, объем элементарной ячейки ферритов $La_{0,5}Re_{0,5}FeO_3$ ($Re=Er, Dy, Gd, Eu, Sm, Nd$) [17]

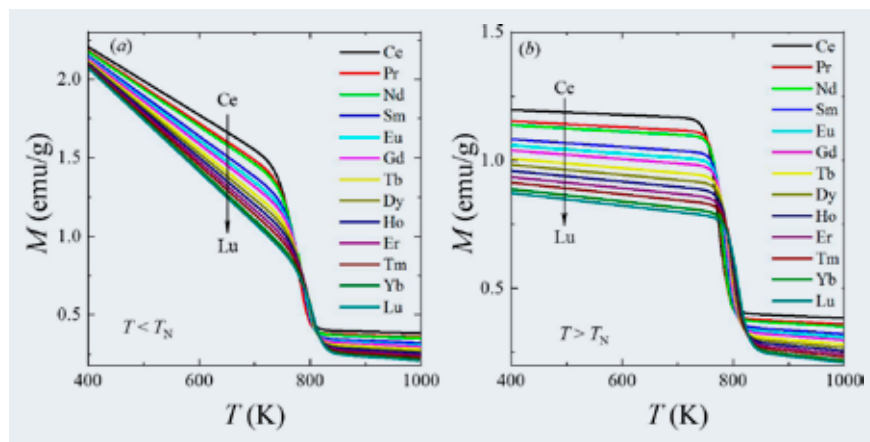


Рис. 2. Температурные зависимости удельной намагниченности $\text{La}_{0.50}\text{R}_{0.50}\text{FeO}_3$ (R=Ce-Lu) при $T < T_N$ и $T > T_N$

их элементарных кристаллических ячеек. Одинаковые степени окисления La^{3+} и R^{3+} при катионном замещении не вызывают изменения валентности, что обеспечивает выполнение условия электронейтральности в исследуемых составах.

На рис. 1 приведены зависимости изменения параметров элементарных кристаллических ячеек, осевого соотношения и объема на примере ферритов $\text{La}_{0.50}\text{R}_{0.50}\text{FeO}_3$ (R=Ce-Lu) [16]. В табл. 2 – численные значения величин параметров решетки, объем элементарной ячейки и плотность, определенные по результатам рентгеновских исследований ферритов $\text{La}_{0.5}\text{Re}_{0.5}\text{FeO}_3$ (Re=Er, Dy, Gd, Eu, Sm, Nd) [17].

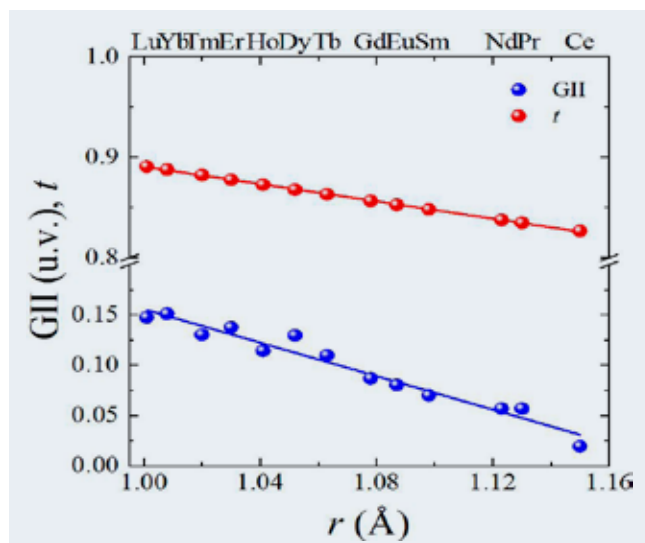


Рис. 3. Зависимости глобального индекса нестабильности (GII) и фактора толерантности Гольдшмидта (t) от радиуса R-катиона, рассчитанные при использовании программы SPuDS [19]

Из данных рис. 1 следует, что малые изменения расстояний между катионами и анионами в элементарной ячейке исключают резкие изменения величины энергии обменных магнитных взаимодействий. Поэтому величины удельной намагниченности и температур магнитных фазовых превращений «магнитный порядок – магнитный беспорядок» $\text{La}_{0.50}\text{R}_{0.50}\text{FeO}_3$ (R=Ce-Lu) изменяются также предсказуемо (рис. 2).

Зависимости изменения параметров решетки

от типа РЗЭ катиона согласуются с результатами, полученными для ортоферритов $\text{Eu}_{0.2}\text{R}_{0.8}\text{FeO}_3$ [18]. Уменьшение степени октаэдрического искажения $S=2(b-a)/(b+a)$, наблюдаемое при увеличении значений радиусов замещающих РЗЭ катионов, связано с систематическим увеличением значений параметров решетки a и b относительно небольшого уменьшения значений $b-a$. Полученные данные показывают, что искажение увеличивается с уменьшением радиуса катиона замещающего РЗЭ.

Кроме того, независимые исследования параметров кристаллической решетки (a , b , c), объема элементарной ячейки (V), степени орторомбического искажения (S) и соотношения параметров кристаллической решетки (c/a) для $\text{La}_{0.5}\text{Re}_{0.5}\text{FeO}_3$ (Re=Ce-Lu) проведены с использованием программы SPuDS [19]. Значения объема, рассчитанные с помощью SPuDS, примерно на 2–4% выше тех, что определены экспериментально. Однако динамика их поведения в зависимости от типа РЗЭ катиона аналогична экспериментальным данным. Объем элементарной ячейки V_{Calc} и V_{Exp} образцов уменьшается в ряду замещающих катионов от Ce^{3+} до Lu^{3+} . Это связано с эффектом 4f-сжатия, вызванным размерным фактором [19]. Согласно результатам расчетов, увеличение объема кристаллической решетки с увеличением радиусов замещенных R^{3+} -катионов сопровождается разнонаправленным изменением величин структурных искажений S и отношения c/a . Величина орторомбической деформации S уменьшается, и отмечается небольшое увеличение c/a , что согласуется с результатами экспериментального

исследования. Рассчитанные значения индекса глобальной нестабильности (GII) и фактора толерантности (t) (рис. 3) свидетельствуют о высокой стабильности кристаллических решеток составов $\text{La}_{0,5}\text{Re}_{0,5}\text{FeO}_3$. Даже в наименее устойчивой решетке состава $\text{La}_{0,5}\text{Lu}_{0,5}\text{FeO}_3$ индекс GII не превышает 0,15 мкВ, а значение t -фактора изменяется от 0,89 до 0,83, что несколько меньше нижнего граничного значения интервала $0,87 < t < 0,99$ для решетки пространственной группы Pbnm .

Анализ зависимостей, представленных на рис. 1–3, убедительно демонстрирует, что использование практически всего ряда РЗЭ (от церия до лютеция) позволяет плавно изменять основные физико-химические параметры ферритов $\text{La}_{0,50}\text{R}_{0,50}\text{FeO}_3$ ($\text{R}=\text{Ce}-\text{Lu}$). Соответственно, создаются условия для изменения диапазонов работы в широких интервалах температур и концентраций приборных матриц на их основе.

Заключение

Учитывая практическую важность и востребованность приборов и устройств, содержащих РЗЭ, а также имеющиеся в Республике Беларусь предприятия и научные коллективы, обладающие определенным опытом работы с редкоземельными элементами, видится необходимым активизировать исследовательскую работу и приложить усилия для синтеза и внедрения РЗЭ в приборостроение и технологические процессы. Особый интерес представляют тонкие пленки веществ, содержащих РЗЭ, в том числе наноразмерных толщин, для поддержания тренда миниатюризации изделий микроэлектроники. Это будет способствовать переходу ряда отраслей народного хозяйства на новый уровень развития.

Известно, что в России, в Сибири, имеются колоссальные залежи редкоземельных металлов, но они пока не разрабатываются. Их добыча, комплексная переработка и широкое использование может стать стратегическим проектом Союзного государства России и Беларуси, включающим создание соответствующих технологий, ведущих к повышению качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции. Объединение усилий в этом направлении на государственном уровне позволит России совместно с Китаем, где также имеются значительные запасы данного сырья, практически управлять мировым рынком РЗЭ.

Союзный проект может быть значительно усилен, если будет учитывать освоение также находящегося в Сибири Попигаевского месторождения природных абразивных материалов (поликристаллических алмазов), которые обладают уникальными свойствами для изготовления инструментальных материалов и изделий из них. ■

Работа выполнена при финансовой поддержке
Белорусского республиканского фонда
фундаментальных исследований (проект №Т22УЗБ-045).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шибанов Г.П. Промышленность редкоземельных металлов как фундамент прогресса авиационно-космических технологий // Проблемы безопасности полетов. 2014. №10. С. 12–16.
2. Михайлов Ю.М. Редкоземельные металлы как основа получения перспективных материалов, необходимых для развития вооружения и военной техники / Федеральный справочник: оборонно-промышленный комплекс. – М., 2014.
3. Дегтерева Е.А. Механизмы превентивного реагирования США на угрозы национальной безопасности (на примере поставок редкоземельных металлов) // Армия и общество. 2012. №1. С. 122–127.
4. Калашникова Ю.В. Инновационно-стратегические проблемы российской промышленности и редкоземельные металлы // Омский научный вестник. 2013. №4(121). С. 61–64.
5. Будущее – за композитами и редкоземельными металлами // <http://www.soyuzmash.ru/news/budushchee-za-kompozitami-i-redkozemelnyimi-metallami>.
6. Кудреватых Н.В., Волегов А.С. Физика металлов. Редкоземельные металлы и их соединения: учебное пособие. – М., 2020.
7. Вальков А.В. Технично-экономические особенности редкоземельного производства // Цветные металлы. 2012. №3. С. 13–15.
8. Тейлор К. Интерметаллические соединения редкоземельных металлов // Перевод с англ. Под ред С.В. Вонсовского. – М., 1974.
9. Оганесян Т. Конкуренция на редких землях STIMUL.ONLINE // <https://zen.yandex.ru/id/5bb5ecb3374f9d00abf46c9a>.
10. Н.М. Осыковский, Г.П. Шибанов. Возможности развития авиационной техники военного назначения в условиях жесткого финансового кризиса // Проблемы безопасности полетов. 2010. №7. С. 26–29.
11. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 3–10.
12. Дегтерев Д.А., Дегтерева Е.А. Редкоземельные металлы в вооружениях и военной технике США / Центр военно-политических исследований // <http://eurasian-defence.ru/?q=node/247>.
13. Приоритеты и основные достижения белорусской науки / Научно-технологическая безопасность. – Минск, 2023.
14. Makoed I.I. Predicted model of magnetocaloric effect in BiFeO_3 -based multiferroics / I.I. Makoed [et al.] // Solid State Sciences. 2019. Vol. 95. P. 105–920.
15. Makoed I.I. Evolution of structure and magnetic properties in $\text{EuxBi}_{1-x}\text{FeO}_3$ / I.I. Makoed [et al.] // J. Magn. Mater. 2019. Vol. 489. P. 165–379.
16. Makoed I.I. Influence of rare-earth doping on the structural and dielectric properties of orthoferrite $\text{La}_0.50\text{R}_0.50\text{FeO}_3$ ceramics synthesized under high pressure / I.I. Makoed [et al.] // Journal of Alloys and Compounds. 2020. Vol. 842. P. 155–859. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155859>.
17. Янушкевич К.И. Влияние внешних энергетических воздействий на структурные характеристики и магнитные свойства ортоферритов $\text{Re}_0.5\text{La}_0.5\text{FeO}_3$ ($\text{Re} = \text{Dy}, \text{Gd}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Er}, \text{Eu}$) / Янушкевич К.И., Живулько А.М., Мазаник Т.Ч. и др. / Отчет НИР договора с ОИЯИ (Дубна), номер гос. пер. №20213149 от 25.08.2021. – Минск, 2021.
18. Liu X., Jin M., Zhang C., Mössbauer spectroscopy study on double rare-earth orthoferrites $\text{Eu}_0.2\text{R}_0.8\text{FeO}_3$ ($\text{R} = \text{rare earth}$) // J. Appl. Phys. 1992. Vol. 71. P. 5111–5114.
19. Lufaso M.W., Woodward P.M. The prediction of the crystal structures of perovskites using the software program SPuDS // Acta Cryst. 2001. Vol. 57. P. 725–738.