

**ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
КРИСТАЛЛОВ**

УДК 541.135.4+546.161+548.55

**ФТОР-ИОННАЯ ПРОВОДИМОСТЬ КРИСТАЛЛОВ СУПЕРИОННОГО
ПРОВОДНИКА $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$**

© 2019 г. Н. И. Сорокин^{1,*}, Д. Н. Каримов¹, И. С. Волчков¹, Ю. В. Григорьев¹, Б. П. Соболев¹¹ Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, Россия

* E-mail: nsorokin1@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.01.2019 г.

После доработки 14.01.2019 г.

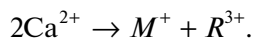
Принята к публикации 28.01.2019 г.

Исследована температурная (479–827 К) зависимость фтор-ионной проводимости кристаллов нестехиометрической фазы $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$ со структурой типа флюорита (пр. гр. $Fm\bar{3}m$, параметр решетки $a = 5.5785(1)$ Å). Кристаллы получены из расплава методом Бриджмена во фторирующей атмосфере SF_4 . В структуре кристаллов $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$ наиболее вероятно образование октаэдро-кубических кластеров дефектов $\{(\text{Na}, \text{Tb})_8[\text{Tb}_6\text{F}_{37}]\text{F}_{32}\}$. Величина ионной проводимости $\sigma_{dc} = 2.6 \times 10^{-6}$ и 3×10^{-3} См/см при 500 и 827 К соответственно. Предложена кристаллофизическая модель ионного переноса в кристаллах $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$. Рассчитаны концентрация и подвижность носителей заряда, которые составляют $n_{mob} = 1.45 \times 10^{21}$ см⁻³ и $\mu_{mob} = 1.1 \times 10^{-8}$ см²/сВ при 500 К.

DOI: 10.1134/S0023476119040234

ВВЕДЕНИЕ

В области средних составов бинарных систем $\text{MF}-\text{RF}_3$ (M – щелочные элементы Na, K, Rb и R – редкоземельные элементы Y, La–Lu) существуют нестехиометрические фазы переменного состава (анион-избыточные твердые растворы) $M_{0.5-x}R_{0.5+x}F_{2+2x}$ со структурой типа флюорита (CaF_2) [1–3]. В этих системах ни один из компонентов MF и RF_3 не имеет флюоритовой модификации, поэтому появление нестехиометрических флюоритовых фаз $M_{0.5-x}R_{0.5+x}F_{2+2x}$ свидетельствует о стабилизации флюоритовой структуры при гетеровалентных замещениях:



Флюоритовые фазы $M_{0.5-x}R_{0.5+x}F_{2+2x}$ имеют области гомогенности, ширина которых в зависимости от качественного состава изменяется в интервале 49–67 мол. % RF_3 . С точки зрения фундаментальных исследований нестехиометрические фазы $M_{0.5-x}R_{0.5+x}F_{2+2x}$ представляют интерес как структурно-разупорядоченные кристаллы с высоким содержанием дефектов. Кристаллы $M_{0.5-x}R_{0.5+x}F_{2+2x}$ обладают высокой фтор-ионной проводимостью [4–10] и являются перспективными материалами для ионики и фотоники [11].

Экспериментальные исследования фторидных систем $\text{KF}-\text{RF}_3$ и $\text{RbF}-\text{RF}_3$, получение в монокристаллической форме нестехиометрических

флюоритов с высоким содержанием фторидов калия и рубидия осложнены высокой гигроскопичностью MF . Несмотря на то что системы с участием KF и RbF интенсивно изучались, многие опубликованные данные искажены пирогидролитом [2, 3].

Как компонент NaF является химически более устойчивым соединением, чем KF и RbF . В натрий-редкоземельных системах $\text{NaF}-\text{RF}_3$ образуются флюоритовые нестехиометрические фазы $\text{Na}_{0.5-x}R_{0.5+x}F_{2+2x}$ при $R = \text{Pr}-\text{Lu}$, Y (исключая La). Фазы $\text{Na}_{0.5-x}R_{0.5+x}F_{2+2x}$ с $R = \text{Dy}-\text{Lu}$, Y плавятся конгруэнтно и сохраняются в метастабильном состоянии при охлаждении. Для $R = \text{Dy}-\text{Lu}$, Y из расплава методом Бриджмена были выращены серии кристаллов $\text{Na}_{0.5-x}R_{0.5+x}F_{2+2x}$ [12, 13] и исследована их ионная проводимость [7–10]. По величине ионной проводимости кристаллы $\text{Na}_{0.5-x}R_{0.5+x}F_{2+2x}$ ($R = \text{Dy}-\text{Lu}$, Y) относятся к среднетемпературным твердым электролитам. Также изучались магнитные [14], оптические [12, 13], лазерные [13, 15], сцинтилляционные [16] и механические свойства [12, 17] этих кристаллов.

Представляет интерес расширить семейство кристаллических твердых электролитов $\text{Na}_{0.5-x}R_{0.5+x}F_{2+2x}$, включив в его состав кристаллы $\text{Na}_{0.5-x}\text{Tb}_{0.5+x}F_{2+2x}$. Флюоритовая нестехиометрическая фаза $\text{Na}_{0.5-x}\text{Tb}_{0.5+x}F_{2+2x}$ в системе $\text{NaF}-\text{TbF}_3$ имеет область гомогенности 49–

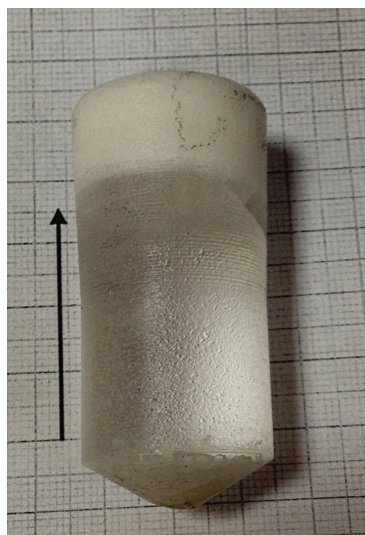


Рис. 1. Внешний вид кристаллической були $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$. Стрелкой указано направление роста.

66 мол. % TbF_3 при эвтектической температуре [1, 18]. Содержание TbF_3 в составе пологого температурного максимума флюоритовой фазы, конгруэнтно плавящейся при температуре $T = 1058 \pm 5^\circ\text{C}$, равно 65 ± 2 мол. % ($x \sim 0.15$). Сложность выращивания кристаллов флюоритовой фазы $\text{Na}_{0.5-x}\text{Tb}_{0.5+x}\text{F}_{2+2x}$ связана с переходным (от конгруэнтного к инконгруэнтному) характером ее плавления в отличие от отчетливо конгруэнтного плавления других фаз $\text{Na}_{0.5-x}\text{R}_{0.5+x}\text{F}_{2+2x}$ ($\text{R} = \text{Dy-Lu, Y}$). При охлаждении граничных составов $\text{Na}_{0.51}\text{Tb}_{0.49}\text{F}_{1.98}$ и $\text{Na}_{0.34}\text{Tb}_{0.66}\text{F}_{2.32}$ из области гомогенности фазы $\text{Na}_{0.5-x}\text{Tb}_{0.5+x}\text{F}_{2+2x}$ происходит их распад по эвтектоидной схеме при 800 и 755°C соответственно. Однако при быстром охлаждении выращенных кристаллов ниже 750°C возможно их получение в метастабильном состоянии. В [19] была продемонстрирована возможность получения из расплава методом Бриджмена кристаллов $\text{Na}_{0.5-x}\text{Tb}_{0.5+x}\text{F}_{2+2x}$ для магнитооптических исследований.

Целью работы являются получение кристаллов состава $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$, исследование температурной зависимости их ионной проводимости и рассмотрение кристаллофизической модели ионного переноса в этих кристаллах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выращивание кристаллов $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$ (состав приведен по шихте) проводили из расплава методом Бриджмена в графитовых тиглях с использованием фторирующей атмосферы CF_4 . Методика роста кристаллов $\text{Na}_{0.5-x}\text{Tb}_{0.5+x}\text{F}_{2+2x}$

приведена в [19]. Продукт кристаллизации в начальной и конечной частях имел поликристаллический вид (образование мелкокристаллической массы), в центральной части был прозрачным и не содержал рассеивающих включений (рис. 1).

Рентгенофазовый анализ продуктов кристаллизации расплава состава $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$ проводили на порошковом рентгеновском дифрактометре Rigaku MiniFlex 600 на излучении CuK_α в диапазоне углов дифракции $2\theta = 10^\circ - 120^\circ$. Идентификацию фаз осуществляли с привлечением базы данных ICDD PDF. Для расчета параметров решетки использовали пакет программ Jana2006 [20], позволяющий проводить полнопрофильный анализ дифрактограммы методом Le Bail в рамках известной пространственной группы симметрии.

Рентгенофазовый анализ показал, что мелкокристаллическая масса на начальном и конечном участках були содержит смесь фаз TbF_3 (структурный тип $\beta\text{-YF}_3$, пр. гр. $Pnma$ с параметрами $a = 6.509(1)$, $b = 6.944(1)$, $c = 4.388(1)$ Å) и $\beta\text{-NaTbF}_4$ со структурой гагаринита (тип NaCaYF_6 , пр. гр. $P6_3/m$, $a = 6.0274(1)$, $c = 3.5637(1)$ Å), что соответствует фазовой диаграмме системы NaF-TbF_3 (рис. 2а, 2в). Центральная прозрачная часть були представляет собой флюоритовый твердый раствор $\text{Na}_{0.5-x}\text{Tb}_{0.5+x}\text{F}_{2+2x}$ (тип CaF_2 , пр. гр. $Fm\bar{3}m$) с параметром решетки $a = 5.5785(1)$ Å (рис. 2б). Появление второй фазы в нижней части кристаллической були носит стохастический характер и зависит от диаметра выращиваемого кристалла, наличия затравки и скорости перемещения тигля. Характер плавления фазы $\text{Na}_{0.5-x}\text{Tb}_{0.5+x}\text{F}_{2+2x}$ требует дополнительного исследования.

Образцы для электрофизических измерений вырезали из центрального прозрачного участка кристаллической були. Плотность образцов, измеренная методом гиростатического взвешивания, составила $\rho = 5.83(1)$ г/см³ при $T = 300$ К.

Элементный состав образца $\text{Na}_{0.5-x}\text{Tb}_{0.5+x}\text{F}_{2+2x}$ исследовали методом энергодисперсионного рентгеновского микроанализа с использованием растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6000PLUS (Neoscope II). На рис. 3 представлен рентгеновский энергодисперсионный спектр от поверхности кристалла $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$. В спектре присутствуют пики характеристического рентгеновского излучения натрия, тербия, фтора и кислорода, адсорбированного на поверхности образца. Результат расчета катионного соотношения Na:Tb методом бесстандартного энергодисперсионного рентгеновского микроанализа и оценка состава по аналитической зависимости $a = f(x)$ по данным [21] показали, что химический состав изучаемого кристалла близок к составу исходной шихты $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$ (таблица 1).

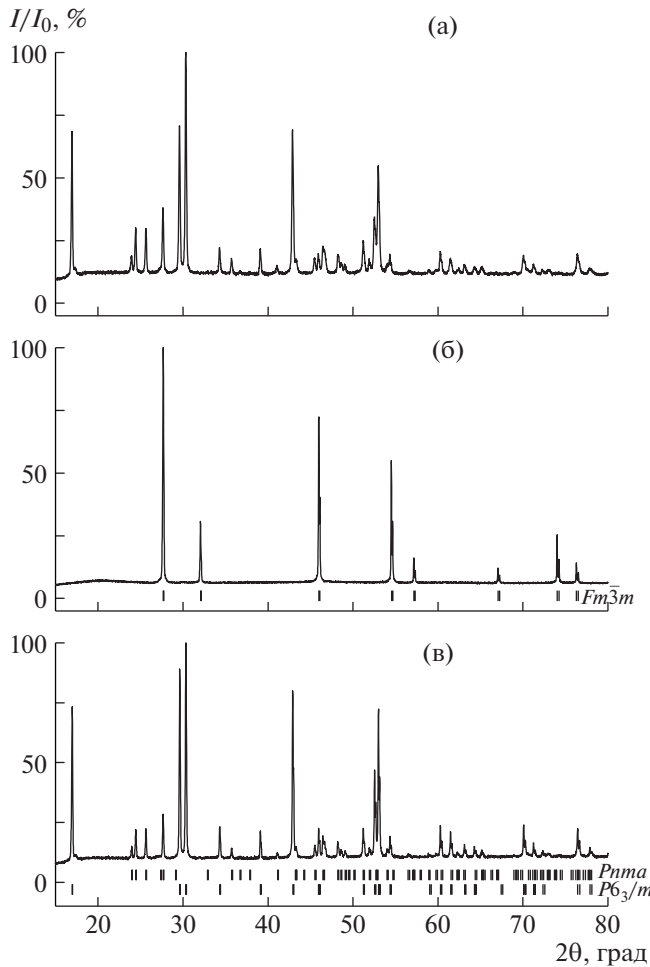


Рис. 2. Рентгенограммы продуктов кристаллизации расплава состава $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$ из нижнего (а), среднего (б) и верхнего (в) участков кристалла. Показаны положения рефлексов Брэгга для фаз указанных пространственных групп.

Электрофизическое исследование образца $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$ проведено на лабораторной экспериментальной установке (собственная конструкция и изготовление СКБ ИК РАН). Кристалл $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$ принадлежит к кубической сингонии, поэтому ориентирование образцов относительно кристаллографических осей не проводили. Толщина образцов $h = 1.6$ мм, площадь графитовых электродов (паста Dag-580) $S = 25$ мм². Статическую электропроводность на постоянном токе σ_{dc} определяли методом импедансной спектроскопии. Импедансные измерения выполняли в диапазонах частот $5-5 \times 10^5$ Гц и сопротивлений $1-10^7$ Ом (прибор Tesla BM-507) в вакууме ~ 1 Па в интервале температур 479–827 К. Методика электрофизических измерений приведена в [22]. Относительная погрешность измерений σ_{dc} не превышала 5%. Наличие в спектрах импеданса блокирующего эффекта от инертных (графито-

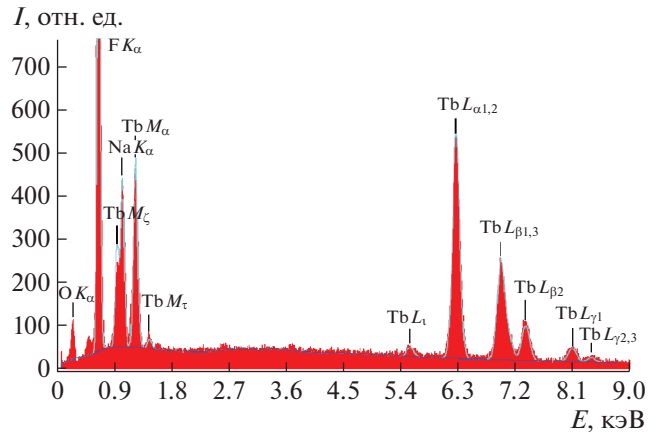


Рис. 3. Данные энергодисперсионного анализа образца из центральной части кристалла $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$. Над пиками обозначены линии излучения соответствующих химических элементов.

вых) электродов при низких частотах указывает на ионный характер электропереноса.

Температурная зависимость проводимости $\sigma_{dc}(T)$ для кристалла $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$ показана на рис. 4 (кривая 1). Для сравнения на рис. 1 приведены данные по проводимости для кристалла CaF_2 – родоначальника структуры флюорита (кривая 2). При $T \sim 700$ К зависимость $\sigma_{dc}(T)$ для монокристалла $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$ разделяется на два участка, каждый из которых обрабатывали по уравнению Френкеля–Аррениуса:

$$\sigma_{dc}T = A \exp(-\Delta H_{\sigma}/kT),$$

где A – предэкспоненциальный множитель проводимости, ΔH_{σ} – энтальпия активации ионного транспорта, k – постоянная Больцмана, T – температура. Параметры уравнения Френкеля–Аррениуса составляют: $A = 3.65 \times 10^4$ См К/см, $\Delta H_{\sigma} = 0.74 \pm 0.02$ эВ при $T < 700$ К и $A = 4.84 \times 10^7$ См К/см, $\Delta H_{\sigma} = 1.17 \pm 0.02$ эВ при $T > 700$ К. Величина σ_{dc} равна 2.6×10^{-6} См/см при 500 К и возрастает до 3×10^{-3} См/см при 827 К (на 3 порядка). Полученные результаты для кристалла $\text{Na}_{0.5-x}\text{Tb}_{0.5+x}\text{F}_{2+2x}$ и электрофизические данные для кристаллов $\text{Na}_{0.5-x}\text{R}_{0.5+x}\text{F}_{2+2x}$ ($R = \text{Y, Dy-Lu}$) [8] показывают, что в семействе натрий-редкоземельных флюоритов при переходе от лутеция к тербию значения σ_{dc} при $T = 500$ К уменьшаются

Таблица 1. Результаты определения содержания TbF_3 в кристалле $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$

Содержание TbF_3 , мол. %		
По шихте	По данным микроанализа	По данным [21]
63.0	64.5	63.8

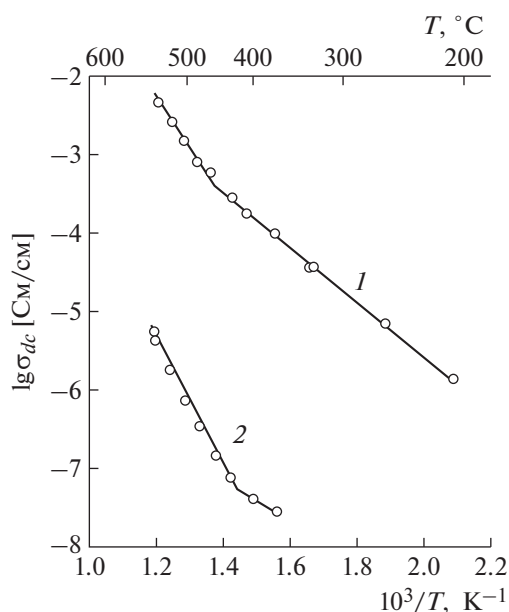
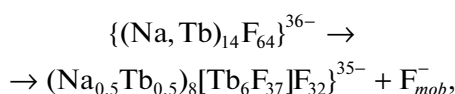


Рис. 4. Температурные зависимости ионной проводимости $\sigma_{dc}(T)$ кристаллов $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$ (1) и CaF_2 (2).

в ~ 50 раз. Это падение ионной проводимости связано с возрастанием потенциальных барьеров для миграции носителей заряда от 0.65 эВ (Lu) до 0.74 эВ (Tb) [8].

Ионный перенос в кристаллах $\text{Na}_{0.5-x}\text{R}_{0.5+x}\text{F}_{2+2x}$ происходит в анионной подрешетке и обусловлен прыжковой миграцией межузельных фторов F_{int}^- [6]. Согласно рентгено- и нейтроно-дифракционным исследованиям [4, 23–25] в кристаллической решетке $\text{Na}_{0.5-x}\text{R}_{0.5+x}\text{F}_{2+2x}$ ($R = \text{Y}, \text{Ho}$) образуются октаэдро-кубические кластеры $\{M_8[R_6F_{37}]F_{32}\}$, где $8M^{2+} = 4\text{Na}^+ + 4R^{3+}$. По структурным данным октаэдро-кубические кластеры $\{M_8[R_6F_{37}]F_{32}\}$ образуются также в нестехиометрических флюоритах $\text{Ca}_{1-x}\text{R}_x\text{F}_{2+x}$ ($R = \text{Dy}, \text{Ho}, \text{Er}, \text{Tm}, \text{Yb}, \text{Lu}, \text{Y}$), $\text{Sr}_{1-x}\text{R}_x\text{F}_{2+x}$ ($R = \text{Lu}, \text{Y}$) и $\text{Ba}_{1-x}\text{R}_x\text{F}_{2+x}$ ($R = \text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Dy}, \text{Ho}, \text{Yb}, \text{Lu}, \text{Y}$) [26–36].

Поскольку по структурным признакам трифториды RF_3 ($R = \text{Tb}, \text{Dy}, \text{Ho}$) относятся к одной группе трифторидов РЗЭ [2], в структуре кристалла $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$ возникают кластеры типа $\{(\text{Na}_{0.5}\text{Tb}_{0.5})_8[\text{Tb}_6\text{F}_{37}]F_{32}\}$. Схема гетеровалентных замещений во флюоритовой структуре $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$ имеет вид (блочный изоморфизм):



где F_{mob}^- – подвижный носитель заряда. Из этой схемы следует, что на каждые 10 катионов Tb^{3+} приходится один подвижный анион F_{mob}^- . Кон-

центрацию n_{mob} и подвижность носителей заряда μ_{mob} можно найти по формулам:

$$n_{mob} = Z(0.5 + x)/10a^3,$$

$$\mu_{mob} = \sigma_{dc}/qn_{mob},$$

где $Z = 4$, q – заряд носителя. Значения n_{mob} и μ_{mob} (при $T = 500$ К) для кристалла $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$ равны $1.45 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$ и $1.1 \times 10^{-8} \text{ см}^2/\text{сВ}$ соответственно. Количество подвижных ионов фтора по отношению к их общему количеству n_F в кристалле $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$ ($x = 0.13$) составляет

$$n_{mob}/n_F = (0.5 + x)/[10(2 + 2x)] = 0.028 \text{ (2.8\%)}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована ионная проводимость кристаллов нестехиометрической фазы $\text{Na}_{0.37}\text{Tb}_{0.63}\text{F}_{2.26}$ (тип CaF_2), полученных из расплава методом Бриджмена. В рамках модели прыжковой проводимости и предположения о типе октаэдро-кубического кластера $\{(\text{Na}, \text{Tb})_8[\text{Tb}_6\text{F}_{37}]F_{32}\}$ рассчитаны концентрация носителей заряда (подвижных ионов фтора) $n_{mob} = 1.45 \times 10^{21} \text{ см}^{-3}$ и их подвижность $\mu_{mob} = 1.1 \times 10^{-8} \text{ см}^2/\text{сВ}$ при $T = 500$ К.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-02-00877 А) в части выращивания кристаллических образцов и Министерством науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию в части исследования характеристик кристаллов с использованием оборудования Центра коллективного пользования Федерального научно-исследовательского центра “Кристаллография и фотоника” РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thoma R.E., Insley H., Hebert G.M. // Inorgan. Chem. 1966. V. 5. № 7. P. 1222.
2. Sobolev B.P. The Rare Earth Trifluorides. Part 1. The Rare Earth Trifluorides. Institute of Crystallography, Moscow and Institut d'Estudis Catalans, Barcelona, Spain, 2000. 520 p.
3. Федоров П.П. // Журн. неорган. химии. 1999. Т. 44. № 11. С. 1791.
4. Pontonnier L., Patrat G., Aleonard D. et al. // Solid State Ionics. 1983. V. 9–10. P. 549.
5. Pontonnier L., Aleonard D., Roux M.T. // J. Solid State Chem. 1987. V. 69. P. 10.
6. Тошматов А.Д., Аухадеев Ф.Л., Терпиловский Д.Н. и др. // ФТТ. 1990. Т. 32. № 9. С. 2563.
7. Федоров П.П., Вистинь Л.Л., Самохина А.А. и др. // Тез. докл. VIII Симп. по химии неорган. фторидов. Полеской, 1987. С. 381.
8. Сорокин Н.И., Иванов-Шиц А.К., Вистинь Л.Л., Соболев Б.П. // Кристаллография. 1992. Т. 37. Вып. 2. С. 421.

9. *Сорокин Н.И., Быстрова А.А., Кривандина Е.А. и др.* // Кристаллография. 1999. Т. 44. № 1. С. 128.
10. *Сорокин Н.И., Соболев Б.П., Брайтер М.* // Электрохимия. 2002. Т. 38. № 5. С. 579.
11. *Каминский А.А.* Лазерные кристаллы. М.: Наука, 1975. 256 с.
12. *Кривандина Е.А., Быстрова А.А., Соболев Б.П. и др.* // Кристаллография. 1992. Т. 37. Вып. 6. С. 1523.
13. *Бежанов В.А., Михайлин В.В., Чернов С.П. и др.* // Оптика и спектроскопия. 2006. Т. 101. № 4. С. 605.
14. *Боигас Х., Иума Ж., Техада Х. И др.* // Кристаллография. 2001. Т. 46. № 3 С. 534.
15. *Шаронов М.Ю., Братусь А.Л., Севастьянов Б.К. и др.* // Кристаллография. 1993. Т. 38. Вып. 6. С. 184.
16. *Васильченко В.Г., Жмурова З.И., Кривандина Е.А. и др.* // Приборы и техника эксперимента. 2000. Т. 43 № 1. Р. 53.
17. *Блистанов А.А., Каримов Д.Н., Кугаенко О.М. и др.* // Материалы электронной техники. 2004. № 1. С. 38.
18. *Федоров П.П., Бучинская И.И., Быстрова А.А. и др.* // Журн. неорган. химии. 1996. Т. 41. № 10. С. 1715.
19. *Каримов Д.Н., Соболев Б.П., Иванов И.А. и др.* // Кристаллография. 2014. Т. 59. № 5. С. 788.
20. *Petricek V., Dusek M., Palatinus L.* // Z. Kristallogr. 2014. В. 229. № 5. S. 345.
21. *Федоров П.П., Александров В.Б., Бондарева О.С. и др.* // Кристаллография. 2001. Т. 46. № 2. С. 280.
22. *Иванов-Шиц А.К., Сорокин Н.И., Федоров П.П., Соболев Б.П.* // ФТТ. 1983. Т. 25. С. 1748.
23. *Pontonnier L., Patrat G., Aleonard D.* // J. Solid State Chem. 1990. V. 87. № 1. P. 124.
24. *Журова Е.А., Максимов Б.А., Халл С. и др.* // Кристаллография. 1997. Т. 42. № 2. С. 277.
25. *Отрощенко Л.П., Фыкин Л.Е., Быстрова А.А., Соболев Б.П.* // Кристаллография. 2000. Т. 45. № 6. С. 1006.
26. *Отрощенко Л.П., Александров В.Б., Быданов Н.Н. и др.* // Кристаллография. 1988. Т. 33. Вып. 3. С. 764.
27. *Лошманов А.А., Максимов Б.А., Мурадян Л.А. и др.* // Координац. химия. 1989. Т. 15. № 8. С. 1133.
28. *Golubev A.M., Ivanov-Shits A.K., Simonov V.I. et al.* // Solid State Ionics. 1990. V. 37. P. 115.
29. *Григорьева Н.Б., Отрощенко Л.П., Максимов Б.А. и др.* // Кристаллография. 1996. Т. 41. № 1. С. 54.
30. *Григорьева Н.Б., Отрощенко Л.П., Максимов Б.А. и др.* // Кристаллография. 1996. Т. 41. № 4. С. 644.
31. *Григорьева Н.Б., Максимов Б.А., Отрощенко Л.П. и др.* // Кристаллография. 1998. Т. 43. № 3. С. 414.
32. *Григорьева Н.Б., Максимов Б.А., Соболев Б.П.* // Кристаллография. 2000. Т. 45. № 5. С. 788.
33. *Максимов Б.А., Губина Ю.В., Белоконева Е.Л. и др.* // Кристаллография. 2002. Т. 47. № 3. С. 417.
34. *Голубев А.М., Отрощенко Л.П., Молчанов В.Н., Соболев Б.П.* // Кристаллография. 2008. Т. 53. № 6. С. 1023.
35. *Голубев А.М., Отрощенко Л.П., Молчанов В.Н. и др.* // Кристаллография. 2009. Т. 54. № 3. С. 456.
36. *Сульянова Е.А., Верин И.А., Соболев Б.П.* // Кристаллография. 2012. Т. 57. № 1. С. 79.