

04

## Корреляционный параметр Хейвена для диффузии фтора в супериониках $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$

© Н.И. Сорокин

Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ „Кристаллография и фотоника“ РАН, Москва, Россия

E-mail: nsorokin1@yandex.ru

(Поступила в Редакцию 21 мая 2018 г.

В окончательной редакции 28 мая 2018 г.)

Процессы переноса электрического заряда (проводимость) и массы (диффузия) в супериониках  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$  определяются подвижными ионами фтора. Из экспериментальных данных по ионной проводимости  $\sigma_{dc}$  рассчитаны коэффициенты хаотичной диффузии фтора  $D_\sigma$  для монокристаллов  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$  при содержании 1, 3, 5, 7.5, 10 и 15 mol.% легирующего компонента  $\text{SrF}_2$ . На зависимости  $D_\sigma(y)$  наблюдается максимум в области 3–5 mol.%  $\text{SrF}_2$ . Определена величина корреляционного параметра Хейвена  $H_r = D_{NMR}/D_\sigma$  ( $D_{NMR}$  — коэффициент диффузии фтора, измеренный методом магнитного резонанса на ядрах  $^{19}\text{F}$ ), которая характеризует механизм ионного переноса в кристаллах  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$ . Значения  $H_r$  составляют  $0.75 \pm 0.15$ ,  $0.45 \pm 0.15$  и  $0.65 \pm 0.15$  при 400–800 К для 1, 3 и 15–16 mol.%  $\text{SrF}_2$  соответственно. Суперионик  $\text{La}_{0.97}\text{Sr}_{0.03}\text{F}_{2.97}$  с максимальными значениями  $\sigma_{dc}$  и  $D_\sigma$ , имеет минимальную величину параметра Хейвена. Полученные значения  $H_r$  указывают, что диффузия фтора в супериониках  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$  не осуществляется по вакансионному механизму с участием одиночных вакансий, а происходит путем кооперативного движения ионов проводимости  $\text{F}^-$ .

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства научных организаций (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26).

DOI: 10.21883/FTT.2018.12.46723.102

### 1. Введение

Процессы образования точечных дефектов в кристаллах неорганических фторидов определяют их структурно-чувствительные свойства, в том числе перенос электрического заряда (электропроводность) и массоперенос (диффузию). Для микроскопического описания механизма ионной проводимости во фторидных супериониках, обладающих униполярной проводимостью по ионам фтора, важным является исследование параметра Хейвена (фактора корреляции) для диффузии фтора [1–5]

$$H_r = D/D_\sigma, \quad (1)$$

где  $D$  — экспериментально измеренный коэффициент диффузии и  $D_\sigma$  — коэффициент диффузии, рассчитанный из измерений фтор-ионной проводимости.

Трифторид лантана является базовой матрицей для синтеза фторпроводящих суперионных проводников  $\text{La}_{1-y}\text{M}_y\text{F}_{3-y}$  ( $M = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$ ) [6–8].  $\text{LaF}_3$  (тисонит) имеет две структурные формы: низкотемпературная  $\beta\text{-LaF}_3$  относится к тригональной пр.гр.  $R\bar{3}c1$  („большая“ элементарная ячейка, число структурных единиц  $Z = 6$ ), высокотемпературная  $\alpha\text{-LaF}_3$  — к гексагональной пр.гр.  $R\bar{6}_3/mmc$  („малая“ элементарная ячейка,  $Z = 2$ ). Низкотемпературная модификация  $\beta\text{-LaF}_3$  является сверхструктурой по отношению к высокотемпературной  $\alpha\text{-LaF}_3$ , связь между их параметрами

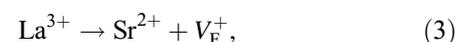
решетки задается выражениями

$$\begin{aligned} a_\alpha &= a_\beta/\sqrt{3}, \\ c_\alpha &= c_\beta. \end{aligned} \quad (2)$$

Трансформация  $\beta\text{-LaF}_3$  в  $\alpha\text{-LaF}_3$  происходит вследствие размытого фазового перехода при  $1377 \pm 25^\circ\text{C}$ , незадолго до температуры плавления  $1500 \pm 8^\circ\text{C}$  [9].

На фазовой диаграмме системы  $\text{SrF}_2\text{-LaF}_3$  [10] область гомогенности гетеровалентных твердых растворов  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$  с переменным числом атомов в элементарной ячейке составляет 0–17 mol.%  $\text{SrF}_2$  ( $0 \leq y \leq 0.17$ ,  $y$  — мольная доля  $\text{SrF}_2$ ). Кривая плавления твердых растворов имеет точку максимума при  $7 \pm 1$  mol.%  $\text{SrF}_2$  и  $1512 \pm 10^\circ\text{C}$  [11]. Введение  $\text{SrF}_2$  в матрицу  $\text{LaF}_3$  стабилизирует высокотемпературную модификацию  $\alpha\text{-LaF}_3$ . Концентрационный переход от  $\beta$ - к  $\alpha$ -форме наблюдается при 5–7 mol.%  $\text{SrF}_2$  [12] и примерно совпадает с точкой максимума на кривой плавкости твердых растворов  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$ .

Несоответствие ионных радиусов, электронных конфигураций и степени окисления катионов  $\text{La}^{3+}$  и  $\text{Sr}^{2+}$  приводит к ослаблению катион-анионных связей и появлению сильного структурного разупорядочения в анионной подрешетке кристаллов  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$



где  $V_{\text{F}}^+$  — вакансия фтора. При охлаждении монокристаллов  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$ , выращенных из расплава, уро-

вень примесно-индуцированного разупорядочения анионной подрешетки сохраняется при комнатной температуре (в противоположность собственному термическому разупорядочению тисонитовой матрицы  $\text{LaF}_3$ ).

В [12–14] нами проведены измерения ионной проводимости  $\sigma_{dc}$  монокристаллов  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$  при содержании 1, 3, 5, 7.5, 10 и 15 mol.% компонента  $\text{SrF}_2$ . Обнаружен нелинейный рост  $\sigma_{dc}$  твердых растворов с изменением состава ( $y$ ). Кристалл  $\text{La}_{0.95}\text{Sr}_{0.05}\text{F}_{2.95}$  ( $y = 0.05$ ) обладает максимальной фтор-ионной проводимостью  $\sigma_{dc} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ S/cm}$  при комнатной температуре (293 К), превышающей собственную проводимость матрицы  $\beta\text{-LaF}_3$  [12,15] на  $\sim 4\text{--}5$  порядков.

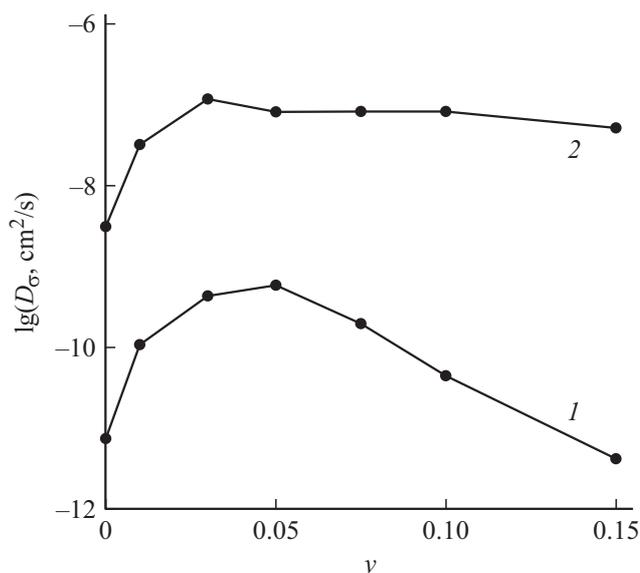
Для исследования диффузии во фторпроводящих кристаллах классический метод радиоактивных меток не применим из-за отсутствия подходящих радиоактивных изотопов фтора. Изучение коэффициентов диффузии в супериониках, обладающих высокой подвижностью ионов фтора, может быть выполнено с применением диффузионной методики магнитного резонанса на ядрах  $^{19}\text{F}$  в градиентном магнитном поле (спиновое эхо) [16], которая позволяет выделить движение конкретного типа изотопа из общего диффузионного процесса. Сравнение данных по электропроводности и  $^{19}\text{F}$  ЯМР особенно важны для выявления природы фтор-ионного переноса в суперионных проводниках.

В работе [17] методом  $^{19}\text{F}$  ЯМР в импульсном градиенте магнитного поля были измерены коэффициенты диффузии фтора  $D_{NMR}$  в суперионных монокристаллах  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$  при содержании 0.01, 0.3, 1, 3, и 16 mol.%  $\text{SrF}_2$ . В этой работе для трех кристаллов  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$  с небольшим содержанием второго компонента 0.3; 1 и 3 мол.%  $\text{SrF}_2$  приведена общая оценка величины параметра Хейвена, которая составляет  $H_r = 0.5 \pm 0.2$ .

Целью работы являлось исследование корреляционного параметра Хейвена для диффузии фтора в супериониках  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$  при изменении концентрации от 1 до 15–16 mol.%  $\text{SrF}_2$  в интервале температур 400–800 К.

## 2. Коэффициенты диффузии $D_\sigma$ в супериониках $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$ , рассчитанные из измерений фтор-ионной проводимости

Монокристаллы  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$  были выращены из расплава методом направленной кристаллизации Бриджмена в Институте кристаллографии РАН; описание методики роста кристаллов дано в работах [13,18]. Для подавления реакции пиролиза рост кристаллов проводили во фторирующей атмосфере, содержащей гелий и газообразные продукты пиролиза политетрафторэтилена. Химический состав монокристаллических образцов  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$  определялся по величине параметра элементарной ячейки [19] и соответствовал составу



**Рис. 1.** Концентрационная зависимость коэффициента хаотической диффузии  $D_\sigma(y)$  для супериоников  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$  при температурах 293 (1) и 500 К (2).

схиты с точностью  $\pm 1$  mol.%  $\text{SrF}_2$ . Содержание примеси кислорода в кристаллах было на уровне 0.05 mass.%.

Процессы переноса электрического заряда и диффузии в кристаллах в  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$  обусловлены трансляционным движением ионов фтора в анионной подрешетке. Расчет коэффициентов хаотической диффузии фтора  $D_\sigma$  выполнен по уравнению Нернста–Эйнштейна:

$$D_\sigma = \sigma_{dc} kT / n_F q^2, \quad (4)$$

где  $\sigma_{dc}$  — ионная проводимость,  $n_F$  — концентрация ионов фтора,  $q$  — электрический заряд,  $T$  — температура,  $k$  — постоянная Больцмана. Данные по статической электропроводности  $\sigma_{dc}$ , измеренной нами переменноточным методом импедансной спектроскопии в интервале температур 293–800 К в вакууме  $10^{-1}$  Па, взяты из работы [13]. Концентрация фтора в тисонитовых твердых растворах  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$  составляет:

$$n_F = 2Z(3 - y) / \sqrt{3} a^2 c. \quad (5)$$

Значения параметров элементарной ячейки определены из концентрационных зависимостей [19]:

$$\begin{aligned} a(y) &= 7.186 - 0.076y, \\ c(y) &= 7.352 + 0.094y. \end{aligned} \quad (6)$$

На рис. 1 показана зависимость коэффициента диффузии  $D_\sigma(y)$  кристаллов  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$  от состава при двух температурах 293 и 500 К. Можно видеть, что концентрационная зависимость  $D_\sigma(y)$  при 293 К имеет явно выраженный максимум в области составов 3–5 mol.%  $\text{SrF}_2$  ( $y = 0.03\text{--}0.05$ ). Такой же максимум наблюдался нами на концентрационной зависимости ионной проводимости

$\sigma_{dc}(y)$  [13]. С ростом температуры зависимость  $D_\sigma(y)$  сглаживается, что приводит к размытию максимума.

Гетеровалентные замещения катионов  $\text{La}^{3+}$  на  $\text{Sr}^{2+}$  (зарядовая неоднородность катионной подсистемы) позволяют сохранить высокотемпературное структурно-разупорядоченное состояние анионной подсистемы кристаллов при их охлаждении. Согласно структурным исследованиям [12] в кристаллах  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$  наблюдается недозаселенность кристаллографических позиций фтора, нарастающая с ростом содержания „примесного“ компонента  $\text{SrF}_2$ . Дефицит ионов фтора в кристаллографических позициях, связанный с появлением катионов пониженной валентности  $\text{Sr}^{2+}$ , приводит к росту диффузионной подвижности фтора в кристаллах при введении до 5 mol.%  $\text{SrF}_2$ . При содержании в кристаллах выше 5 mol.%  $\text{SrF}_2$  подвижность фтора в анионной подрешетке падает вследствие усиливающихся ион-ионных взаимодействий между ними [13,20], приводящих к увеличению энthalпии активации ионного переноса.

### 3. Параметр Хейвена для диффузии фтора в супериониках $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$

Коэффициенты направленной диффузии  $D_{NMR}$ , измеренные методом  $^{19}\text{F}$  ЯМР диффузометрии (спиновое эхо) в монокристаллах супериоников  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$  с 1, 3 и 16 мол.%  $\text{SrF}_2$ , взяты из работы [17]. В таблице приведены рассчитанные значения параметра Хейвена  $H_r$  для трех кристаллов  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$  с 1, 3 и 15–16 мол.%  $\text{SrF}_2$  при 500 К. На рис. 2 показаны зависимости параметра Хейвена  $H_r$  для этих кристаллов в интервале температур 400–800 К. Средние значения  $H_r$  составляют  $0.75 \pm 0.15$ ,  $0.45 \pm 0.15$  и  $0.65 \pm 0.15$  для кристаллов с  $y = 0.01$ ,  $0.03$  и  $0.15$  соответственно. Значение  $H_r = 0.45 \pm 0.15$  для наиболее проводящего

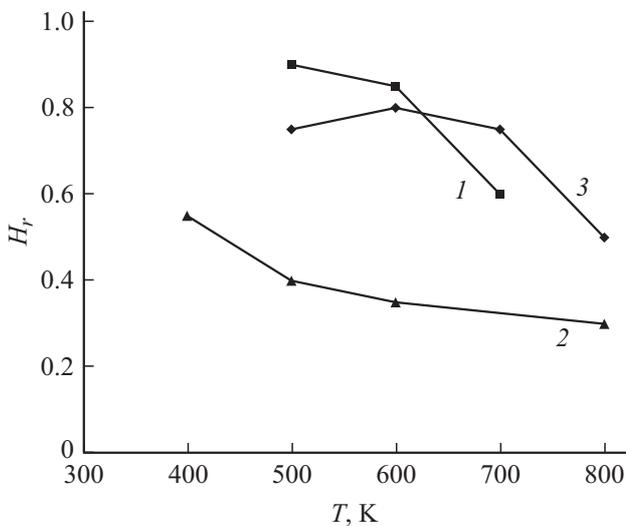


Рис. 2. Изменения параметра Хейвена  $H_r$  при 400–800 К в супериониках  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$ : 1 —  $y = 0.01$ , 2 —  $y = 0.03$  и 3 —  $y = 0.15-0.16$ .

Таблица 1. Постоянно-токовая проводимость  $\sigma_{dc}$ , коэффициенты диффузии фтора  $D_\sigma$  и  $D_{NMR}$ , параметр Хейвена  $H_r$  в супериониках  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$  при 500 К

Кристалл	$\sigma_{dc}$ , S/cm [1]	$D_\sigma$ , $\text{cm}^2/\text{s}$	$D_{NMR}$ , $\text{cm}^2/\text{s}$ [2]	$H_r$
$\text{La}_{0.99}\text{Sr}_{0.01}\text{F}_{2.99}$	$6.6 \cdot 10^{-3}$	$3.3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$	0.9
$\text{La}_{0.97}\text{Sr}_{0.03}\text{F}_{2.97}$	$2.4 \cdot 10^{-2}$	$1.2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$	0.4
$\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$ ( $y = 0.15-0.16$ )	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$5.3 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-8}$	0.75

кристалла  $\text{La}_{0.97}\text{Sr}_{0.03}\text{F}_{2.97}$  хорошо совпадает с оценкой  $H_r = 0.35-0.4$  для кристалла  $\text{CaF}_2$  в суперионном состоянии при 1500–1700 К, выполненной по результатам метода молекулярной динамики [21].

Полученные значения  $H_r$  для супериоников  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$  указывают, что диффузия фтора не реализуется по вакансионному механизму с участием одиночных вакансий ( $H_r = 0.78$  [22]) и свидетельствуют о кооперативном характере движения ионов проводимости  $\text{F}^-$ . С ростом температуры наблюдается снижение величины  $H_r$ , что свидетельствует об усилении согласованности прыжков ионов  $\text{F}^-$ . Кооперативные эффекты играют важную роль в представлениях о суперионной проводимости в кристаллах. Коллективные взаимодействия между ионами приводят к понижению свободной энергии кристалла [23] и, как отмечено в работе [24], являются причиной „размытости“ суперионного перехода во флюоритовых кристаллах дифторидов  $\text{MF}_2$  ( $M = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}, \text{Cd}, \text{Pb}$ ) [25–27] и тисонитовых кристаллах трифторидов  $\text{RF}_3$  ( $R = \text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}$ ) [9].

Величина параметра  $H_r$  определяется координацией диффундирующего атома в кристаллах и ее можно оценить по формуле [28]:

$$H_r = (1 - P)/(1 + P), \quad P = 1/m, \quad (7)$$

где  $m$  — число ближайших позиций. В анионной подрешетке тисонитовых кристаллов атомы фтора располагаются в трех типах кристаллографических позиций  $F_1$  (позиции  $12g$  пр.гр.  $P\bar{3}c1$ ),  $F_2$  (позиции  $4b$ ) и  $F_3$  (позиции  $2a$ ). В структурной модификации  $\beta\text{-LaF}_3$  позиции  $F_2$  и  $F_3$  являются структурно близкими, а в модификации  $\alpha\text{-LaF}_3$  эти позиции совпадают, образуя общую позицию  $F_{2,3}$ . При рассмотрении динамических свойств можно рассматривать две фторные подсистемы  $F_1$  и  $F_{2,3}$  [29–31].

Фторы, расположенные в позициях  $F_1$  и  $F_{2,3}$ , в разной степени участвуют в диффузионных процессах в условиях тепловой активации. По данным исследований  $^{19}\text{F}$  ЯМР спектроскопии и релаксометрии [29–31] при  $T < T_0$  ( $T_0 = 420-450$  К [13] соответствует изгибу на зависимости  $\sigma_{dc}(y)$ ) наиболее вероятными являются прыжки атомов фтора в кристаллах  $\text{La}_{1-y}\text{Sr}_y\text{F}_{3-y}$ , в пределах системы кристаллографических позиций  $F_1$ .

При  $T > T_0$  прыжки атомов фтора происходят в пределах всей анионной подрешетки, включающей системы кристаллографических позиций  $F_1$  и  $F_{2,3}$ .

Для атома  $F_1$  число ближайших соседей [32] по анионной подрешетке равно  $3F_1 + F_{2,3}$  ( $m = 4$ ) и значение параметра Хейвена составляет  $H_r = 0.6$ . Рассчитанное значение  $H_r$  по формуле (7) для структуры тисонита удовлетворительно совпадает с полученными экспериментальными значениями  $H_r$  для кристаллов  $La_{1-y}Sr_yF_{3-y}$ .

#### 4. Заключение

Гетеровалентные замещения катионов  $La^{3+}$  на  $Sr^{2+}$  приводят к сильному структурному разупорядочению анионной подсистемы кристаллов  $La_{1-y}Sr_yF_{3-y}$  с образованием вакансий фтора. Проанализированы концентрационные зависимости коэффициента хаотической диффузии фтора  $D_\sigma$ , рассчитанные из измерений фтор-ионной проводимости. Концентрационная зависимость  $D_\sigma(y)$  имеет максимум в области составов 3–5 mol.%  $SrF_2$ . Процессы ионного транспорта и диффузии в супериониках  $La_{1-y}Sr_yF_{3-y}$  определяются подвижными ионами  $F^-$ . Определены значения корреляционного параметра Хейвена  $H_r$  в супериониках  $La_{1-y}Sr_yF_{3-y}$  при содержании легирующего компонента 1, 3 и 15–16 mol.%  $SrF_2$ . Полученные значения  $H_r$  указывают на кооперативное движение ионов фтора в кристаллах  $La_{1-y}Sr_yF_{3-y}$ . Суперионик  $La_{0.97}Sr_{0.03}F_{2.97}$ , обладающий максимальными значениями  $\sigma_{dc}$  и  $D_\sigma$ , характеризуется минимальным значением параметра Хейвена  $H_r = 0.35–0.05$  (при 400–800 К).

#### Список литературы

- [1] K. Compaan, Y. Haven. *Trans. Faraday. Soc.* **52**, 786 (1956).
- [2] Физика электролитов / Под ред. Дж. Хладика. Мир, М. (1978). 555 с.
- [3] R.E. Gordon, J.H. Strange. *J. Phys. C* **11**, 3213 (1978).
- [4] G.A. Evangelakis, V. Pontikis. *Phys. Rev. B* **43**, 3180 (1991).
- [5] V.V. Sinitsyn, O. Lips, A.F. Privalov, I.V. Murin. *J. Phys. Chem. Solids* **64**, 1201 (2003).
- [6] Н.И. Сорокин, Б.П. Соболев. *Кристаллография* **52**, 870 (2007).
- [7] Б.П. Соболев, Н.И. Сорокин. *Кристаллография* **59**, 891 (2014).
- [8] V.P. Sobolev, N.I. Sorokin, N.B. Bolotina. *Photonic and Electronic Properties of Fluoride Materials / Eds. A. Tressaud, K. Poeppelmeier. Elsevier, Amsterdam (2016). 465 p.*
- [9] O. Greis, M.S.R. Cader. *Thermochim. Acta* **87**, 145 (1985).
- [10] V.P. Sobolev, K.B. Seiranian. *J. Solid State Chem.* **39**, 17 (1981).
- [11] Е.А. Кривандина, З.И. Жмурова, О.И. Лямина, А.А. Быстрова, Л.П. Отрощенко, Б.П. Соболев. *Кристаллография* **41**, 958 (1996).
- [12] Н.Б. Болотина, Т.С. Черная, А.И. Калюканов, И.А. Верин, Н.И. Сорокин, Л.Е. Фькин, Н.Н. Исакова, Б.П. Соболев. *Кристаллография* **60**, 391 (2015).
- [13] Н.И. Сорокин, Б.П. Соболев. *Кристаллография* **39**, 889 (1994).
- [14] Н.И. Сорокин, Б.П. Соболев. *Электрохимия* **43**, 420 (2007).
- [15] Н.И. Сорокин. *Журн. физ. химии* **76**, 391 (2002).
- [16] А.К. Иванов-Шиц, И.В. Мурин. *Ионика твердого тела. Изд-во СПб-ГУ, СПб. (2000). Т. 1. 616 с.*
- [17] F. Fujara, D. Kruk, O. Lips, A.F. Privalov, V. Sinitsyn, H. Stork. *Solid State Ionics* **179**, 2350 (2008).
- [18] Н.И. Сорокин Н.И., Б.П. Соболев. *ФТТ* **50**, 402 (2008).
- [19] Б.П. Соболев, В.Б. Александров, П.П. Федоров, К.Б. Сейранян, Н.Л. Ткаченко. *Кристаллография* **21**, 96 (1976).
- [20] И.В. Мурин, О.В. Глузов, Ю.В. Амелин. *ЖПХ* **53**, 1474 (1980).
- [21] А.К. Иванов-Шиц. *Кристаллография* **52**, 131 (2007).
- [22] K. Compaan, Y. Haven. *Trans. Faraday. Soc.* **54**, 1498 (1958).
- [23] Ю.Я. Гуревич, Ю.И. Харкац. *Суперионные проводники. Наука, М. (1992). 288 с.*
- [24] Р.А. Эварестов, И.В. Мурин. *ФТТ* **30**, 292 (1988).
- [25] A.S. Dworkin, M.A. Bredig. *J. Phys. Chem.* **72**, 1277 (1968).
- [26] Р.И. Ефремова, Э.В. Матизен. *Изв. СО АН СССР. Сер. хим.* **2**, 3 (1970).
- [27] W. Shroter, J. Nolting. *J. Phys.* **41**, 6 (1980).
- [28] Дж. Маннинг. *Кинетика диффузии атомов в кристаллах. Мир, М. (1971). 277 с.*
- [29] М.Г. Изосимова, А.И. Лившиц, В.М. Бузник, П.П. Федоров, Е.А. Кривандина, Б.П. Соболев. *ФТТ* **28**, 2644 (1986).
- [30] D. Kruk, O. Lips, P. Gumann, A.F. Privalov, F. Fujara. *J. Phys.: Condens. Matter.* **18**, 1725 (2006).
- [31] O. Lips, D. Kruk, A.F. Privalov, F. Fujara. *Solid State Nucl. Magn. Res.* **31**, 141 (2007).
- [32] А.К. Иванов-Шиц, И.В. Мурин. *Ионика твердого тела. Изд-во СПб-ГУ, Том 2. СПб. (2010). 1000 с.*

Редактор Т.Н. Василевская