УДК 546.161;549.454;548.55;536.21

# РОСТ КРИСТАЛЛОВ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ КОНГРУЭНТНО ПЛАВЯЩЕГОСЯ ТВЕРДОГО РАСТВОРА Cd<sub>0.77</sub>Sr<sub>0.23</sub>F<sub>2</sub>

© 2019 г. Д. Н. Каримов<sup>1,</sup> \*, И. И. Бучинская<sup>1</sup>, Н. И. Сорокин<sup>1,</sup> \*\*, П. А. Попов<sup>2</sup>, Б. П. Соболев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" Российской академии наук, Россия, 119333 Москва, Ленинский пр., 59

<sup>2</sup>Брянский государственный университет им. акад. И.Г. Петровского, Россия, 241036 Брянск, ул. Бежицкая, 14 \*e-mail: dnkarimov@gmail.ru

> \*\*e-mail: nsorokin1@yandex.ru Поступила в редакцию 15.06.2018 г. После доработки 26.11.2018 г. Принята к публикации 10.12.2018 г.

Кристаллы твердого раствора  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$  (пр. гр.  $Fm\overline{3}m$ , параметр решетки a = 5.4882(1) Å), отвечающие температурному минимуму на кривых плавкости системы  $CdF_2$ —SrF<sub>2</sub>, выращены из расплава методом вертикальной направленной кристаллизации. Изучена их теплопроводность в интервале температур 50—300 К. Для кристаллов  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$  наблюдается слабая зависимость коэффициента теплопроводности от температуры к(*T*). Получены значения  $\kappa_{50} = 1.9$  и  $\kappa_{300} = 1.5$  Bt/(м K) при T = 50 и 300 K соответственно. Проведен сравнительный анализ теплофизических свойств конгруэнтно плавящихся флюоритовых кристаллов  $M_{1-x}Sr_xF_2$  (M = Cd, Ca, Ba) с общим компонентом SrF<sub>2</sub>. Величина  $\kappa_{300}$  кристаллов  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$  по сравнению с  $Ba_{0.66}Sr_{0.34}F_2$  и  $Ca_{0.59}Sr_{0.41}F_2$  меньше в 2.1 и 2.7 раз соответственно.

**Ключевые слова:** рост кристаллов, неорганические фториды, твердые растворы, теплопроводность **DOI:** 10.1134/S0002337X19050087

### **ВВЕДЕНИЕ**

Переход от однокомпонентных к многокомпонентным кристаллам является эффективным методом создания материалов с необходимыми для практики свойствами. Дифториды  $MF_2$  (M = Ca, Sr, Ba, Cd и Pb), принадлежащие к структурному типу флюорита (CaF<sub>2</sub>, пр. гр.  $Fm\overline{3}m, Z=4$ ), являются важными функциональными фторидными материалами. Ассортимент однокомпонентных флюоритовых кристаллов MF<sub>2</sub> можно значительно увеличить за счет изоструктурных твердых растворов  $M_{1-x}M'_{x}F_{2}$ , где M, M' – разные двухвалентные катионы. В системах MF<sub>2</sub>-M'F<sub>2</sub> с парными комбинациями катионов Ca-Sr, Ca-Ba, Ba-Sr, Cd-Sr и Pb-Cd флюоритовые твердые растворы  $M_{1-x}M'_{x}F_{2}$  обладают температурным минимумом на линиях ликвидуса и солидуса [1-6]. Отвечающий составу минимума твердый раствор плавится конгруэнтно, что обеспечивает выращивание однородных кристаллов.

Повышенная механическая прочность (по сравнению с однокомпонентными кристаллами  $MF_2$ ), сохраняющаяся оптическая прозрачность в широком диапазоне длин волн, высокая ионная электропроводность делают кристаллы  $M_{1-x}M'_xF_2$  конгруэнтно плавящихся составов перспективными материалами для сцинтилляторов в физике высоких энергий, оптических элементов в конструкционной оптике, матриц твердотельных лазеров, твердых электролитов в высокотемпературной ионике твердого тела [7, 8].

К семейству конгруэнтно плавящихся твердых растворов  $M_{1-x}M'_{x}F_{2}$ относятся кристаллы Cd<sub>0.77</sub>Sr<sub>0.23</sub>F<sub>2</sub>, для которых выполнены исследования оптических, механических и электрофизических свойств [9, 10]. Кристаллы  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$  прозрачны в ИК-диапазоне спектра до длин волн λ~10 мкм, имеют микротвердость  $\hat{H}_{\mu} = 1.9 \pm 0.4$  ГПа и ионную проводимость  $\sigma = 5.7 \times 10^{-6}$  и  $1.3 \times \times 10^{-2}$  См/см при T == 373 и 673 К соответственно. Для кристаллов состава Cd<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>F<sub>2</sub>, легированных редкоземельными ионами Er<sup>3+</sup> (1 мол. %) и Yb<sup>3+</sup> (4 мол. %), исследованы спектрально-генерационные характеристики при комнатной температуре [11]. Отмечено, что кристаллы  $Cd_{0.7}Sr_{0.3}F_{2}:(Er^{3+}, Yb^{3+})$  имеют хорошее оптическое качество и перспективны для твердотельных лазеров видимой области. Однако теплофизические свойства кристаллов  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$  детально не изучались.

Целью работы является выращивание кристаллов  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$ , отвечающих точке минимума на кривых плавкости флюоритового твердого раствора в системе  $CdF_2$ —SrF2, исследование их теплопроводности в диапазоне от субазотных до



**Рис. 1.** Изменение положения минимума на кривых плавкости в системах  $CdF_2$ -SrF<sub>2</sub> [1] (*1*),  $CaF_2$ -SrF<sub>2</sub> [5] (*2*) и  $BaF_2$ -SrF<sub>2</sub> [3] (*3*).

комнатной температуры и сравнение теплофизических свойств конгруэнтно плавящихся кристаллов  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$ ,  $Ca_{0.59}Sr_{0.41}F_2$  и  $Ba_{0.66}Sr_{0.34}F_2$ . Материалы исследования частично публиковались в работе [12].

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

На рис. 1 приведены фазовые диаграммы систем  $MF_2$ -SrF<sub>2</sub> (M = Cd, Ca, Ba) (по данным [1, 9, 10]). Составы твердых растворов, соответствующие точке минимума в системах  $MF_2$ -SrF<sub>2</sub>, равны  $23 \pm 2$  ( $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$ ),  $34 \pm 2$  ( $Ba_{0.66}Sr_{0.34}F_2$ ) и  $41 \pm 2$  мол. % SrF<sub>2</sub> ( $Ca_{0.59}Sr_{0.41}F_2$ ). Температуры плавления твердых растворов  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$ ,  $Ba_{0.66}Sr_{0.34}F_2$  и  $Ca_{0.59}Sr_{0.41}F_2$  составляют 1025 ± 10, 1305 ± 10 и 1362 ± 10°С соответственно.

В качестве исходных реактивов использовали коммерческие порошки SrF<sub>2</sub> и CdF<sub>2</sub> квалификации "ос. ч.", которые предварительно проплавляли для глубокой очистки от кислородсодержащих примесей в атмосфере продуктов пиролиза политетрафторэтилена. Кристаллы Cd<sub>0.77</sub>Sr<sub>0.23</sub>F<sub>2</sub> выращивали направленной кристаллизацией по методу Бриджмена. Температурный градиент в ростовой зоне печи составлял 80 ± 5°C/см. Скорость опускания тигля с расплавом составляла 4 мм/ч. Скорость охлаждения кристаллов ~100°C/ч. Потери вещества на испарение при кристаллизации не превышали 1 мас. %. Были получены кристаллические були диаметром до 40 и длиной до 80 мм.

Рентгенофазовый анализ кристаллов проводили на порошковом рентгеновском дифрактометре Rigaku MiniFlex 600 на излучении Си $K_{\alpha}$  в диапазоне углов дифракции 2 $\theta = 10^{\circ}-120^{\circ}$ . Для расчета параметров решетки использовали пакет программ JANA 2006. Параметр кубической решетки для Cd<sub>0.77</sub>Sr<sub>0.23</sub>F<sub>2</sub> равен a = 5.4882(1) Å.

Образец для исследования теплофизических характеристик изготовлен из средней части (выросшей в условиях, максимально близких к стационарным) кристаллической були в виде прямоугольного бруска с размерами  $8 \times 8 \times 30$  мм. Теплопроводность к(T) исследована абсолютным стационарным методом продольного теплового потока, описание экспериментальной методики приведено в [13, 14]. Резистивный нагреватель помещался на торцевую поверхность образца для создания в нем плоской формы изотермических поверхностей. Температурный интервал теплофизических измерений составлял 50–300 К. Относительная погрешность определения величины к не превышала 6%.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Температурные зависимости теплопроводности кристаллов  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$ ,  $Ca_{0.59}Sr_{0.41}F_2$  [15] и  $Ba_{0.66}Sr_{0.34}F_2$  [16] показаны на рис. 2. Для кристалла  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$  величина коэффициента теплопроводности при 300 К равна  $\kappa_{300} = 1.5$  Вт/(м К). С уменьшением температуры до 50 К она лишь незначительно возрастает ( $\kappa_{50}/\kappa_{300} \approx 1.2$ ). Изменения теплопроводности кристаллов  $Ca_{0.59}Sr_{0.41}F_2$ и  $Ba_{0.66}Sr_{0.34}F_2$  в этом интервале температур более существенны. Для кристаллов  $Ca_{0.59}Sr_{0.41}F_2$ и  $Ba_{0.66}Sr_{0.34}F_2$  отношение  $\kappa_{50}/\kappa_{300} \approx 7$  ( $\kappa_{300} \approx$  $\approx 4.0$  Вт/(м К)) и  $\kappa_{50}/\kappa_{300} \approx 5.9$  ( $\kappa_{300} \approx 3.1$  Вт/(м К)) соответственно.

Рассчитана длина свободного пробега фононов в кристаллах  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$  с использованием модели Дебая (методика расчета приведена в [14, 17]). Значения средней длины свободного пробега фононов l(T) определяли из дебаевского выражения

$$\kappa = Cvl/3$$
,

где *С* – теплоемкость единицы объема кристалла и *v* – средняя скорость распространения фононов. Для оценки значений *С* и *v* для твердого раствора  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$  использовали метод линейной интерполяции с учетом соответствующих характеристик для компонентов  $CdF_2$  ( $C_{50} =$ = 0.60 МДж/(м<sup>3</sup> K),  $C_{300} = 2.92$  МДж/(м<sup>3</sup> K), *v* = = 2.46 × 10<sup>3</sup> м/с) и SrF<sub>2</sub> ( $C_{50} = 0.40$  МДж/(м<sup>3</sup> K),  $C_{300} = 2.37$  МДж/(м<sup>3</sup> K), *v* = 3.20 × 10<sup>3</sup> м/с) [18]. Значения длины свободного пробега фононов в  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$  равны  $l_{50} = 39$  Å и  $l_{300} = 6$  Å при 50 и 300 К соответственно. Очевидно, незначительное снижение l(T) вместе с близким по величие ростом теплоемкости C(T) определяют выявленную слабую температурную зависимость теплопроводности, не характерную ни для монокристаллов,



Рис. 2. Температурные зависимости теплопроводности монокристаллов  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$  (*1*),  $Ca_{0.59}Sr_{0.41}F_2$ [15] (*2*) и  $Ba_{0.66}Sr_{0.34}F_2$  [16] (*3*).

ни для стекол. Полученная величина  $l_{300}$  практически совпадает со значением параметра элементарной ячейки (a = 5.4882 Å) этого соединения. Аналогичная ситуация наблюдалась для теплопроводности флюоритового твердого раствора Pb<sub>0.679</sub>Cd<sub>0.321</sub>F<sub>2</sub> (пр. гр.  $Fm\overline{3}m$ , a = 5.75963 Å), отвечающего минимуму на кривых плавкости системы PbF<sub>2</sub>–CdF<sub>2</sub> [14].

**Таблица 1.** Теплопроводность кристаллов конгруэнтно плавящихся изовалентных твердых растворов  $M_{1-x}Sr_xF_2$  (M = Cd, Ca, Ba), флюоритовых матриц MF<sub>2</sub> (M = Cd, Ca, Sr, Ba) и гетеровалентных твердых растворов Cd<sub>1-x</sub>R<sub>x</sub>F<sub>2+x</sub> (R = Nd, Ho, Er)

Кристалл	$\kappa(T), BT/(MK)$		
	100 K	300 K	
$Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$	1.65	1.5	
$Ca_{0.59}Sr_{0.41}F_2$	9.0	4.0	
$Ba_{0.66}Sr_{0.34}F_2$	7.2	3.1	
CaF <sub>2</sub>	46	10.1	
SrF <sub>2</sub>	41	9.3	
BaF <sub>2</sub>	32	6.8	
$CdF_2$	13.6	4.4	
$Cd_{0.97}Nd_{0.03}F_{2.03}$	7.7	3.9	
$Cd_{0.85}Ho_{0.15}F_{2.15}$	1.4	1.9	
$Cd_{0.9}Er_{0.1}F_{2.1}$	1.6	1.3	

**Таблица 2.** Ионные радиусы  $r_{ion}$ , электронные поляризуемости  $\alpha_{el}$  и относительные атомные массы *m* катионов  $M^{2+}$ 

M <sup>2+</sup>	r <sub>ion</sub> , Å [19]	$\alpha_{el}^{}, Å^{3} [22]$	т, а.е.м.
$\begin{array}{c} Cd^{2+}\\ Ca^{2+}\\ Sr^{2+}\\ Ba^{2+}\\ \end{array}$	1.24 1.26 1.40 1.56	$     \begin{array}{r}       1.7 \\       0.9 \\       1.4 \\       2.4     \end{array} $	112.41 40.078 87.62 137.33

В табл. 1 для сравнения приведены теплофизические характеристики кристаллов  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$ , изовалентных твердых растворов  $M_{1-x}Sr_xF_2$  (M = Ca, Ba), однокомпонентных кристаллов  $MF_2$  (M = Cd, Ca, Sr, Ba) и гетеровалентных твердых растворов  $Cd_{1-x}R_xF_{2+x}$  (R = Nd, Ho, Er) со структурой флюорита, данные для которых взяты из [15, 16, 18]. Абсолютные значения теплопроводности и поведение температурной зависимости к(T) кристаллов  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$  близки к теплофизическим характеристикам изоструктурных гетеровалентных твердых растворов  $Cd_{0.85}Ho_{0.15}F_{2.15}$  и  $Cd_{0.9}Er_{0.1}F_{2.1}$  на основе флюоритовой матрицы  $CdF_2$  [16, 18].

Существенно более низкая теплопроводность кристаллов  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$  по сравнению с твердыми растворами  $Ca_{0.59}Sr_{0.41}F_2$  и  $Ba_{0.66}Sr_{0.34}F_2$  (табл. 1) обусловлена наличием компонента CdF2, отличающегося по характеристикам от дифторидов шелочноземельных элементов. В табл. 2 даны ионные радиусы r<sub>ion</sub> (в системе "кристаллических" радиусов для к.ч. = 8 [19]), электронные поляризуемости Осели и относительные атомные массы т катионов  $M^{2+}$  (M = Cd, Ca, Sr, Ba). Можно видеть, что в ряду  $CaF_2 - SrF_2 - BaF_2$  величины  $r_{ion}$ ,  $\alpha_{el}$  и т изменяются монотонно. В то же время, несмотря на близость ионных радиусов Cd<sup>2+</sup> и Ca<sup>2+</sup>, их относительные атомные массы и электронные поляризуемости сильно различаются. Для CdF<sub>2</sub> нарушается монотонный характер изменения свойств катионов в ряду  $CdF_2 - CaF_2 - SrF_2 - BaF_2$ .

Поведение температурной зависимости  $\kappa(T)$ для кристаллов  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$  и  $Ca_{0.59}Sr_{0.41}F_2$  с общим компонентом Sr<sup>2+</sup> и с близкими по ионному радиусу компонентами Cd<sup>2+</sup> и Ca<sup>2+</sup> также сильно различается (рис. 2). Различие в характере изменений к(Т) связано с тем, что кристаллы  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$  по сравнению с  $Ca_{0.59}Sr_{0.41}F_2$  имеют большую степень разупорядочения флюоритовой структуры. На это указывает существенно более высокая ионная проводимость (чувствительная к структурным изменениям) кристаллов  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$ [10] по сравнению с Ca<sub>0.59</sub>Sr<sub>0.41</sub>F<sub>2</sub> [15]. Обратная корреляция между теплопроводностью и ионной проводимостью флюоритовых фторидов установлена в [12, 20, 21]. К сожалению, дефектная структура твердого раствора  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$  не изучена.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом вертикальной направленной кристаллизации получены кристаллы твердого раствора  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$  и измерена их теплопроводность. С ростом температуры от 50 до 300 К величина теплопроводности  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$  уменьшается в 1.2 раза и составляет  $\kappa_{300} = 1.5$  Вт/(м К) при 300 К. Проведен сравнительный анализ теплофизических свойств конгруэнтно плавящихся флюоритовых кристаллов  $M_{1-x}Sr_xF_2$  (M = Cd, Ca, Ba) с общим компонентом SrF<sub>2</sub>. Установлена существенно более

низкая теплопроводность кристаллов  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$  в сравнении с  $Ca_{0.59}Sr_{0.41}F_2$  и  $Ba_{0.66}Sr_{0.34}F_2$ , а также другая зависимость к(*T*) (значения к слабо уменьшаются с ростом температуры). Определяющим фактором поведения к(*T*) для кристаллов  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$  является наличие компонента  $CdF_2$ , приводящего к более существенному разупорядочению структуры флюоритового твердого раствора. Рассчитана средняя длина сводного пробега фононов в  $Cd_{0.77}Sr_{0.23}F_2$ , которая при 300 К составляет  $l_{300} = 6$  Å, что близко по величине к параметру элементарной ячейки этого твердого раствора.

# БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН с использованием оборудования центров коллективного пользования ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН и Брянского государственного университета им. акад. И.Г. Петровского.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Kozak A., Samuel M., Chretien A. Miscibilite Cristalline des Fluorures de Calcium, de Strontium et de Plomb dans le Fluorure de Cadmium: Fluorure Double Cd<sub>2</sub>BaF<sub>6</sub> // Rev. Chim. Miner. 1971. V. 8. № 6. P. 805–811.
- 2. Федоров П.П., Бучинская И.И., Ивановская Н.А., Коновалова В.В., Лаврищев С.В., Соболев Б.П. Фазовая диаграмма системы CaF<sub>2</sub>-BaF<sub>2</sub> // Доклады РАН. 2005. Т. 401. № 5. С. 652-654.
- Nafziger R.H. High-Temperature Phase Transformation in BaF<sub>2</sub>−SrF<sub>2</sub> System // J. Am. Ceram. Soc. 1971. V. 54. № 9. P. 467.
- Klimm D., Rabe M., Bertram R., Uecker R., Parthier L. Phase Diagram Analysis and Crystal Growth of Solid Solutions Ca<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>F<sub>2</sub> // J. Cryst. Growth. 2008. V. 310. № 1. P. 152–155. doi 10.1016/j.jcrysgro.2007.09.031
- 5. Урусов В.С., Григораш Ю.П., Казакевич М.В., Карелин В.В. Изовалентный изоморфизм в кристаллах со структурой флюорита // Геохимия. 1980. № 11. С. 1700–1709.
- Сорокин Н.И., Бучинская И.И., Соболев Б.П. Ионная проводимость монокристаллов Pb<sub>0.67</sub>Cd<sub>0.33</sub>F<sub>2</sub> и Pb<sub>0.67</sub>Cd<sub>0.33</sub>F<sub>2</sub>:Ce<sup>3+</sup> // ЖНХ. 1992. Т. 37. № 12. С. 2653–2656.
- Sobolev B.P. The Rare Earth Trifluorides. Pt 2. Introduction to Materials Science of Multicomponent Metal Fluoride Crystals. Moscow Institute of Crystallography and Institut d'Estudis Catalans. Barcelona, 2001. 460 p.
- Sobolev B.P., Sorokin N.I., Bolotina N.B. Nonstoichiometric Single Crystals M<sub>1-x</sub>R<sub>x</sub>F<sub>2+x</sub> and R<sub>1-y</sub>M<sub>y</sub>F<sub>3-y</sub> (M – Ca, Sr, Ba; R – Rare Earth Elements) as Fluorine-Conducting Solid Electrolytes // Photonic & Electronic Properties of Fluoride Materials / Eds. Tressaud A., Poeppelmeier K. Amsterdam: Elsevier, 2016. P. 465–491.
- 9. *Бучинская И.И., Федоров П.П.* Новая оптическая среда монокристалл Cd<sub>0.75</sub>Sr<sub>0.25</sub>F<sub>2</sub> // Кристалло-графия. 2004. Т. 49. № 2. С. 334–336.

- Сорокин Н.И., Бучинская И.И., Сульянова Е.А., Соболев Б.П. Ионный транспорт в изо- и гетеровалентных твердых растворах на основе CdF<sub>2</sub> // Электрохимия. 2005. Т. 41. № 5. С. 627–632.
- Kelai R., Diaf M., Boulma E., Boubekri H., Jouart J.P. Optical Properties of Er<sup>3+</sup>–Yb<sup>3+</sup> Codoped Cd<sub>0.7</sub>Sr<sub>0.3</sub>F<sub>2</sub> Mixed Single Crystals // J. Lumin. 2018. V. 197. P. 310–316. doi 10.1016/j.jlumin.2018.01.006
- Сорокин Н.И., Каримов Д.Н., Бучинская И.И., Попов П.А., Соболев Б.П. Электро- и теплопроводность конгруэнтно плавящихся монокристаллов изовалентных твердых растворов М<sub>1-x</sub>M'<sub>x</sub> F<sub>2</sub> в связи с их дефектной флюоритовой структурой // Кристаллография. 2015. Т. 60. № 4. С. 586–590. doi 10.7868/S0023476115040219
- Popov P.A., Sidorov A.A., Kul'chenkov E.A., Anishchenko A.M., Avetissov I.Ch., Sorokin N.I., Fedorov P.P. Thermal Conductivity and Expansion of PbF<sub>2</sub> Single Crystals // Ionics. 2017. V. 23. № 1. P. 233–239. doi 10.1007/s11581-016-1802-2
- 14. Попов П.А., Матовников А.В., Моисеев Н.В., Бучинская И.И., Каримов Д.Н., Сорокин Н.И., Сульянова Е.А., Соболев Б.П., Крутов М.А. Теплофизические характеристики кристаллов твердого раствора Pb<sub>0.679</sub>Cd<sub>0.321</sub>F<sub>2</sub> // Кристаллография. 2015. Т. 60. № 1. С. 111-115. doi 10.7868/S0023476115010178
- Каримов Д.Н., Комарькова О.Н., Сорокин Н.И., Бежанов В.А., Чернов С.П., Попов П.А., Соболев Б.П. Рост конгруэнтно плавящихся кристаллов Ca<sub>0.59</sub>Sr<sub>0.41</sub>F<sub>2</sub> и исследование их свойств // Кристаллография. 2010. Т. 55. № 3. С. 556–563.
- Попов П.А., Федоров П.П., Конюшкин В.А., Накладов А.Н., Басиев Т.Т. Переход от кристаллического к стеклообразному характеру зависимости теплопроводности в твердом Sr<sub>0.16</sub>Ba<sub>0.54</sub>La<sub>0.3</sub>F<sub>2.3</sub> // Неорган. материалы. 2010. Т. 46. № 5. С. 621–625. doi 10.1134/S0002337X10050209
- Иванов-Шиц А.К., Сорокин Н.И., Арутюнян С.Р., Додокин А.П., Федоров П.П., Соболев Б.П., Кралева Б. Теплопроводность ионных проводников: твердые растворы со структурой флюорита // ФТТ. 1986. Т. 28. № 4. С. 1235–1237.
- 18. Попов П.А. Теплопроводность твердотельных оптических материалов на основе неорганических оксидов и фторидов: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Москва: МГТУ им. Баумана, 2015. 532 с.
- Shannon R.D. Revised Effective Ionic Radii and Systematic Studies of Interatomic Distances in Halides and Chalcogenides // Acta Crystallogr., Sect. A. 1976. V. 32. № 5. P. 751–767.
- Федоров П.П., Попов П.А. Принцип эквивалентности источников беспорядка и теплопроводность твердых тел // Наносистемы: физика, химия, математика. 2013. Т. 4. С. 148–159.
- Федоров П.П., Сорокин Н.И., Попов П.А. Обратная корреляция ионной проводимости и теплопроводности монокристаллов твердых растворов М<sub>1-x</sub>R<sub>x</sub>F<sub>2+x</sub> (M = Ca, Ba, R – редкоземельные элементы) флюоритовой структуры // Неорган. материалы. 2017. Т. 53. № 6. С. 626–632. doi 10.7868/S0002337X17060033
- Jorgensen C.K. Continuum Effects Indicated by Hard and Soft Anti-Bases (Lewis Acides) and Bases // Top. Curr. Chem. 1975. V. 56. P. 1–66.

НЕОРГАНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ том 55 № 5 2019