



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 536.21+546.161+546.654+54-165

Научная специальность ВАК – 1.3.8. Физика конденсированного состояния

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13561>

Полуэмпирическое описание закономерности изменения теплопроводности монокристаллов на примере концентрационной серии твердых растворов $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$

П. А. Попов¹, А. В. Щелоков¹, Н. В. Митрошенков¹, А. А. Кушнерёва¹, В. А. Конюшкин²,
А. Н. Накладов², П. П. Федоров², С. В. Кузнецов²✉

¹ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет им. И. Г. Петровского»
ул. Бежицкая, 14, Брянск 241023, Российская Федерация

²Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук,
ул. Вавилова, 38, Москва 119991, Российская Федерация

Аннотация

Цель работы: Исследование теплопроводности монокристаллов твердого раствора $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ и полуэмпирическое описание закономерности изменения теплопроводности в зависимости от содержания лантана.

Экспериментальная часть: В интервале температур 50–300 К экспериментальным методом продольного теплового потока определена теплопроводность монокристаллических образцов с содержанием лантана от $x = 0.001$ до $x = 0.30$.

Выводы: Выявлена монотонная концентрационная зависимость теплопроводности для твердого раствора $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$. Для аппроксимации экспериментальных значений теплопроводности предложено полуэмпирическое выражение.

Ключевые слова: дифторид бария, лантан, твердый раствор, кластеры дефектов, теплопроводность, полуэмпирическая модель

Для цитирования: Попов П. А., Щелоков А. В., Митрошенков Н. В., Кушнерёва А. А., Конюшкин В. А., Накладов А. Н., Федоров П. П., Кузнецов С. В. Полуэмпирическое описание закономерности изменения теплопроводности монокристаллов на примере концентрационной серии твердых растворов $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2026;28(1): 92–102. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13561>

For citation: Popov P. A., Shchelokov A. V., Mitroshenkov N. V., Kushnereva A. A., Konyushkin V. A., Nakladov A. N., Fedorov P. P., Kuznetsov S. V. Semi-empirical description of the regularity of change in thermal conductivity of single crystals based on the example of a concentration series of $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ solid solutions. *Condensed Matter and Interphases*. 2026;28(1): 92–102. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2026.28/13561>

✉ Кузнецов Сергей Викторович, e-mail: kouznetzovsv@gmail.com

© Попов П. А., Щелоков А. В., Митрошенков Н. В., Кушнерёва А. А., Конюшкин В. А., Накладов А. Н., Федоров П. П., Кузнецов С. В., 2026



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

1. Введение

Объемные кристаллические материалы на основе фторидов кальция, стронция и бария, легированные редкоземельными элементами, являются функциональными элементами фотоники и широко используются в качестве сцинтилляторов [1–5], элементов пассивной и активной оптики [6–10] как в виде монокристаллов [11], так и оптической керамики [12]. Помимо использования в фотонике, данные твердые растворы используют как ионные проводники [13–22], ионные батареи [13–24] и катализаторы [25]. В работе [26] было показано, что теплопроводность оптической керамики хорошего качества не отличается от теплопроводности монокристаллов, что позволяет сопоставлять характеристики между собой.

Для различных применений одной из ключевых характеристик является теплопроводность, так как она обуславливает способность материала к отведению тепла при различных интенсивных видах накачки. Твердые растворы на основе фторидов кальция, стронция и бария, легированные редкоземельными элементами, склонны к образованию кластеров вида R_6F_{36} [27–31], что приводит к сложной зависимости величины теплопроводности от температуры. Это выражается в том, что при увеличении содержания редкоземельного элемента и при увеличении температуры от 50 К до 300 К наблюдается изменение характера температурной зависимости. В области низких концентраций редкоземельного элемента и низких температур характер температурной зависимости типичен для кристаллического материала. При увеличении содержания редкоземельного компонента в области низких температур поведение температурной зависимости похоже на стеклообразное. Столь сложное поведение температурной зависимости крайне трудно описать в связи с тем, что указанные закономерности наблюдаются для образцов одного и того же твердого раствора с одинаковой кристаллической структурой. В работах [32–33] предложены варианты аппроксимации на основе полуэмпирического алгоритма описания поведения такого рода материалов.

При легировании фторидов кальция, стронция и бария активными редкоземельными ионами зачастую наблюдаются процессы частичного восстановления некоторых трехвалентных ионов до двухвалентного состояния (Sm, Eu, Dy, Yb, Tm) [34–37]. Для предотвращения данного эффекта ранее было предложено усложнение ис-

ходной матрицы посредством добавления оптически неактивного иттрия в состав кристаллов. В результате была разработана новая матрица для оптических материалов типа иттрофлюорит, $\text{CaF}_2:\text{Y}$ [38]. Помимо иттрия в различных исследованиях предложено использование лантана [39], который является более эффективным ионом для предотвращения восстановления трехзарядных ионов и предотвращения образования кластеров. Для уменьшения процессов многофононной релаксации желателно использовать матрицы с меньшей энергией фононов, в связи с чем в нашем исследовании была выбрана матрица фторид бария в предпочтении перед фторидами кальция и стронция.

В результате целью исследования было изучение закономерностей и математическое описание изменения величины теплопроводности в температурном диапазоне 50–300 К для твердого раствора $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ при содержании редкоземельного элемента от 0.1 до 30.0 мол. %.

Для аппроксимации экспериментальных значений теплопроводности в температурном интервале мы апробировали достаточно простую полуфеноменологическую модель. Аппроксимация не имеет строгого физического обоснования, но дает возможность достоверным образом описывать зависимости теплопроводности от температуры и может быть полезной для совершенствования теоретических представлений о процессах теплопереноса в средах со сложной структурой.

2. Методика эксперимента

Монокристаллы твердых растворов $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ ($0.001 \leq x \leq 0.30$) были выращены методом Бриджмена в вакуумной ростовой установке с использованием атмосферы Ar и CF_4 в многоячейных графитовых тиглях, позволяющих выращивать концентрационную серию образцов за один ростовой цикл. В качестве исходных реактивов были использованы фторид бария (99.99 %, ЛАНХИТ) и фторид лантана (99.99 %, ЛАНХИТ).

Оценка коэффициента термического расширения в интервале температур от 78 К до комнатной для образцов с содержанием 4, 10 и 20 мол. % La была проведена на основе определения параметров решетки порошков методом Дебая-Шерера на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7.0 (НПО Буревестник, Санкт-Петербург, Россия) с применением рентгеновского криостата [40] в $\text{CuK}\alpha$ излучении с длиной волны 1.54184 Å. Реф-

лексы от кристаллографической плоскости {355} были получены вблизи углов дифракции 146, 147 и 149° соответственно. Погрешность определения параметра решетки во всем изученном интервале температур не превышала $\pm 1 \times 10^{-4}$ Å.

Теплопроводность в интервале температур 50–300 К была измерена абсолютным стационарным методом продольного теплового потока. Аппаратура и методика измерений описаны в [41]. Образцы представляли собой цилиндры диаметром 9.6 мм и длиной 22–26 мм. Погрешность измерений теплопроводности находилась в пределах ± 5 %.

3. Экспериментальные результаты

Предваряя исследование теплофизических характеристик твердых растворов $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$, были изучены зависимости параметра решетки и оценен коэффициент термического расширения в области температур измерения теплопроводности. Экспериментальные точки зависимости параметра решетки $a(T)$ образцов с содержанием лантана 4, 10 и 20 мол. % представлены на рис. 1. Поведение $a(T)$ является типичным для кристаллических материалов и не содержит аномалий, что свидетельствует о высоком качестве образцов. Значения параметра a при $T = 300$ К

составили 6.1864; 6.1661 и 6.1360 Å для 4, 10 и 20 мол. %, соответственно. Они согласуются с данными для концентрационной зависимости $a(x)$, предложенной в [42]. Из данных $a(T)$ были рассчитаны значения коэффициента термического расширения (КТР) в соответствии с выражением $\alpha = \frac{\Delta a}{\Delta T} \cdot \frac{1}{a}$. На рис. 1 представлены ре-

зультаты расчета в сравнении с ранее полученными данными по КТР для состава $Ba_{0.70}La_{0.30}F_{2.30}$ [43] и матрицы BaF_2 [44]. Анализ результатов продемонстрировал, что существенное влияние добавки лантана на КТР наблюдается только в области низких температур.

К настоящему времени известно об исследовании теплопроводности образцов $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ с $x = 0.008, 0.12$ в области низких температур и $x = 0.045, 0.33, 0.46$ с повышением температуры до комнатной [45–46]. Ранее проведенные исследования [46–48] продемонстрировали, что теплопроводность кристалла LaF_3 существенно ниже, чем у BaF_2 .

На величину и температурное поведение теплопроводности напрямую влияет такая характеристика, как теплоемкость. О калориметрических исследованиях твердого раствора

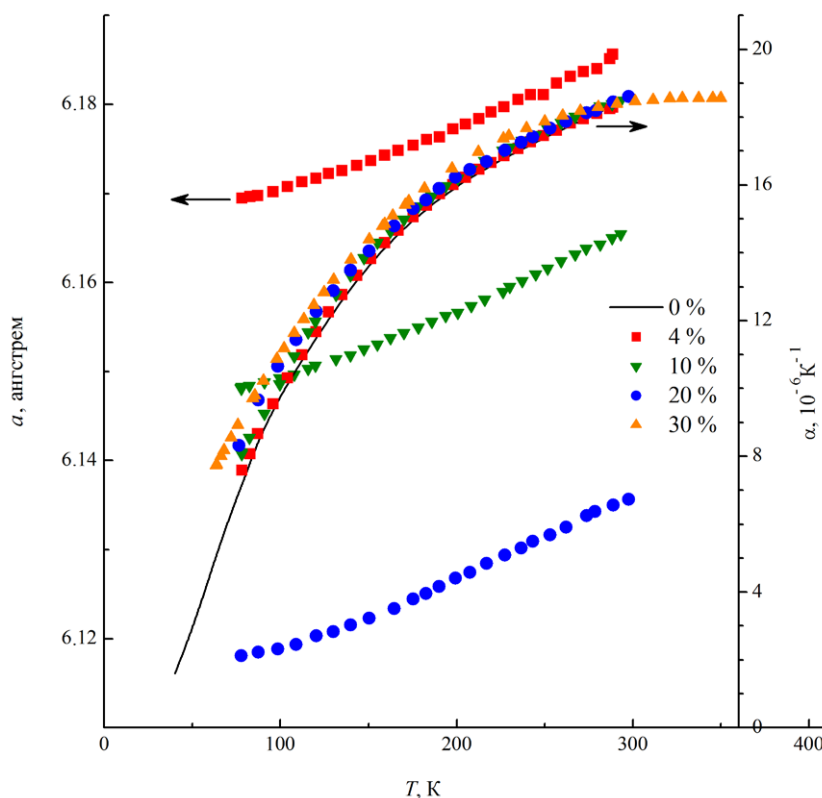


Рис. 1. Температурная зависимость параметра решетки и КТР кристаллов твердого раствора $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$

$Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ в области $T \leq 1$ К сообщалось в [45]. Теплоемкость кристалла $Ba_{0.70}La_{0.30}F_{2.30}$ в интервале 63–313 К исследована в [49]. Авторами [50] измерена теплоемкость образца $Ba_{0.51}La_{0.49}F_{2.49}$ в интервале 500–1000 К. В интервале температур от 77 К до комнатной влияние добавки LaF_3 имеет характер, близкий к аддитивному.

Результаты измерения теплопроводности монокристаллических образцов твердого раствора $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ представлены графически на рис. 2 и в численном виде в табл. 1. На рис. 2 добавлены графики $k(T)$ для ранее исследованных образцов с применением экспериментальной аппаратуры и методики, используемых в настоящей работе: BaF_2 , соответствующего составу $x = 0$ [48], и образцов с $x = 0.25$ и $x = 0.30$ [51]. Маркерами на рис. 2 изображены экспериментальные точки $k(T)$, а линиями – результаты расчета по формуле 1 (см. далее). Отметим, что сравнение наших данных $k(T)$ с представленными графически в [46] показали их близкое соответствие.

Анализ представленных на рис. 2 результатов показывает, что с увеличением содержания лантана величина теплопроводности сильно снижается, убывающая температурная зависимость $k(T)$ ослабевает и переходит в слабую воз-

растающую. Подобное влияние вносимых в кристаллы с флюоритовой структурой трехвалентных редкоземельных элементов обнаружено для многих гетеровалентных твердых растворов типа $M_{1-x}R_xF_{2+x}$, где $M = Ca, Sr, Ba, Cd, R = PЗЭ$ [52–57]. Оно объясняется образованием крупных кластеров дефектов $RF_{3/2}$, являющихся высокоэффективными центрами фононного рассеяния. Теплопроводность высококонцентрированных образцов ниже, чем у кварцевого стекла ($k = 1.36$ Вт/(м·К) при $T = 300$ К [58]). Заметим, что кристаллы твердого раствора $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ характеризуются высокой фтор-ионной проводимостью, возрастающей при увеличении концентрации x [59–68]. Установленная в [69] антикорреляция между теплопроводностью и анионной проводимостью гетеровалентных твердых растворов фторидов с флюоритовой структурой связана с неупругим взаимодействием фононов и подвижных ионов фтора. В соответствии с предложенной в [70] моделью ионного переноса, в кристаллах $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ такие ионы F^- занимают междоузельные позиции.

Отдельно следует отметить, что резкого снижения теплопроводности при снижении температуры до $T = 50$ К, как было отмечено для твер-

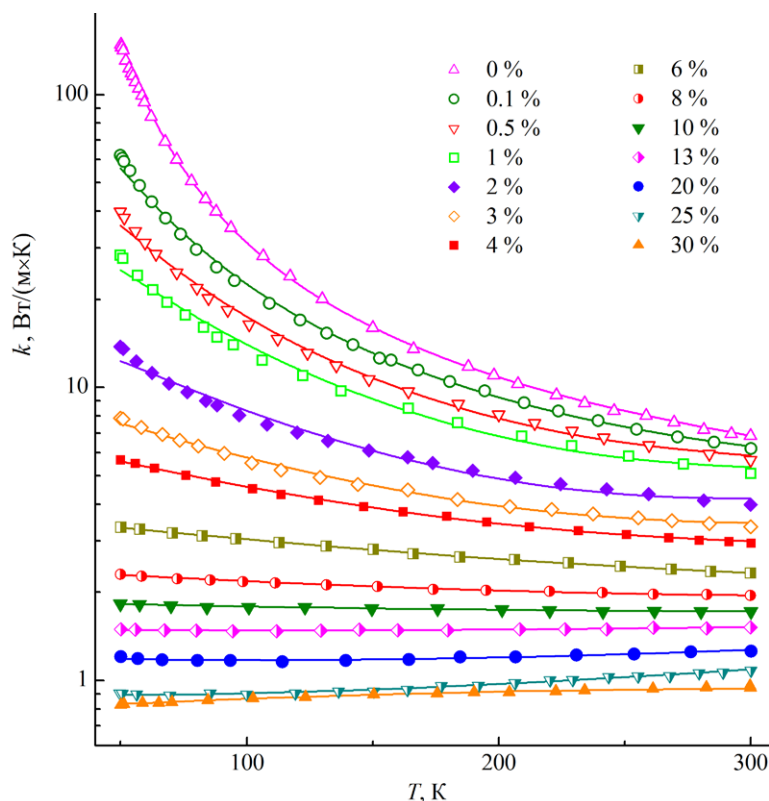


Рис. 2. Температурная зависимость теплопроводности монокристаллов твердого раствора $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ (в легенде содержание La в мол. %)

Таблица 1. Значения теплопроводности (Вт/(м·К)) при различных температурах

Содержание x лантана, мол. доля	Температура, К					
	50	100	150	200	250	300
0.001	62.1	21.8	13.1	9.42	7.36	6.20
0.005	39.9	16.6	10.6	8.11	6.56	5.66
0.01	28.3	13.3	9.08	7.03	5.87	5.10
0.02	13.8	7.91	6.06	5.01	4.42	3.98
0.03	7.86	5.62	4.61	4.00	3.63	3.35
0.04	5.67	4.56	3.86	3.44	3.17	2.95
0.06	3.34	3.03	2.79	2.59	2.44	2.33
0.08	2.30	2.18	2.09	2.03	1.98	1.95
0.10	1.83	1.79	1.76	1.74	1.73	1.72
0.13	1.50	1.48	1.49	1.49	1.50	1.52
0.20	1.21	1.16	1.18	1.20	1.23	1.26
0.25	0.904	0.898	0.936	0.976	1.03	1.08
0.30	0.828	0.865	0.893	0.914	0.929	0.939

дых растворов $\text{Ca}_{1-x}\text{Y}_x\text{F}_{2+2x}$ [56, 71] и $\text{Ba}_{0.50}\text{Ce}_{0.50}\text{F}_{2.50}$ [51], для кристаллов $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+2x}$ не наблюдается. Монотонная возрастающая зависимость $k(T)$ имеет место только для одного состава с максимальным содержанием лантана $x = 0.30$. Очевидно, резкое снижение теплопроводности кристаллов этого твердого раствора будет иметь место при более значительном понижении температуры. У трех высококонцентрированных составов ($x = 0.25, x = 0.20, x = 0.13$) кривые $k(T)$ имеют слабо выраженные минимумы, у всех остальных образцов зависимость $k(T)$ монотонная убывающая.

Концентрационные зависимости теплопроводности твердого раствора $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+2x}$ для двух крайних температур $T = 50$ К и $T = 300$ К представлены на рис. 3. Анализ данных продемонстрировал, что зависимости $k(x)$ являются монотонными, позволяющими достаточно уверенно оценивать значения коэффициента теплопроводности для промежуточных (не исследованных) составов.

Проведено сравнение концентрационных зависимостей теплопроводности $k(x)$ твердого раствора $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+2x}$ и исследованного ранее близкого аналога $\text{Ba}_{1-x}\text{Yb}_x\text{F}_{2+2x}$ с содержанием иттербия до $x = 0.06$ (рис. 4) [48]. Видно, что по теплопроводности кристаллы $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+2x}$ значительно превосходят соответствующие составы $\text{Ba}_{1-x}\text{Yb}_x\text{F}_{2+2x}$. Это может быть обусловлено размерно-весовыми факторами. Радиус катиона бария больше чем у лантана и иттербия, но при этом размер катиона лантана больше, чем у иттербия [72]. Кроме того, атомные массы Ba и La близки и существенно меньше массы Yb. В результате бли-

зость лантана к бариям как по размеру, так и по массе приводит к меньшим изменениям в кристаллической решетке фторида бария по сравнению с иттербием. В результате интенсивность фонон-дефектного рассеяния в случае твердого раствора $\text{Ba}_{1-x}\text{Yb}_x\text{F}_{2+2x}$ будет выше, а, следовательно, теплопроводность – ниже, чем в случае более однородного по катионным характеристикам твердого раствора $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+2x}$.

Для описания экспериментальных значений теплопроводности $k(T)$ исследованных кристаллов $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+2x}$ было использовано выражение (1), предложенное в [33] для описания удельного термического сопротивления $w = 1/k$ гетеровалентных твердых растворов. Оно позволяет удовлетворительно аппроксимировать экспериментальные значения $k(T)$ для твердых растворов $\text{Ca}_{1-x}\text{Y}_x\text{F}_{2+2x}$ [71], $\text{Ca}_{1-x}\text{Yb}_x\text{F}_{2+2x}$ [33] и $\text{Ca}_{1-x-y}\text{Sr}_x\text{Nd}_y\text{F}_{2+2y}$ [73]. Выражение имеет вид:

$$\frac{1}{k} = \frac{(1-A)}{\beta \sqrt{\frac{k_0}{d}} \cdot \arctan\left(\frac{\sqrt{k_0 d}}{\beta}\right)} + \frac{A}{D + BT + CT^2} \quad (1).$$

Здесь A – вклад термического сопротивления, связанный с введением трехвалентных редкоземельных ионов и образованием скоплений дефектов («аморфная составляющая»); β – параметр, зависящий от типа редкоземельной примеси; k_0 – коэффициент теплопроводности не легированного кристалла; d – концентрация редкоземельной примеси (в случае двухкомпонентного твердого раствора $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+2x}$ она равна мольной доли x); T – температура в К. Пара-

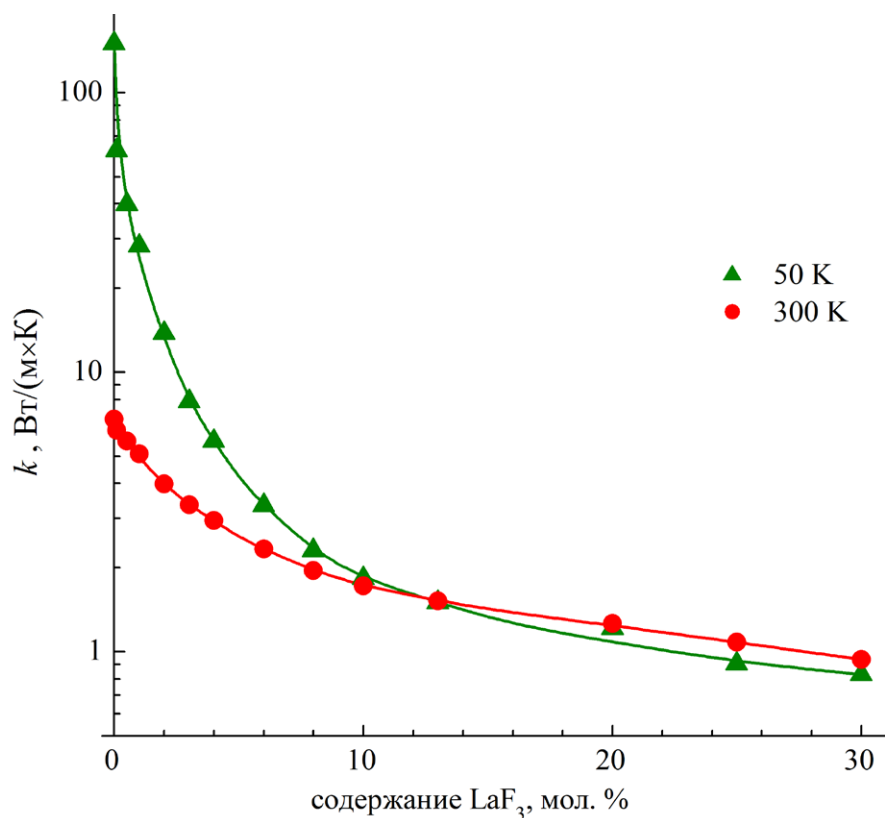


Рис. 3. Концентрационная зависимость теплопроводности твердого раствора $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ для разных температур

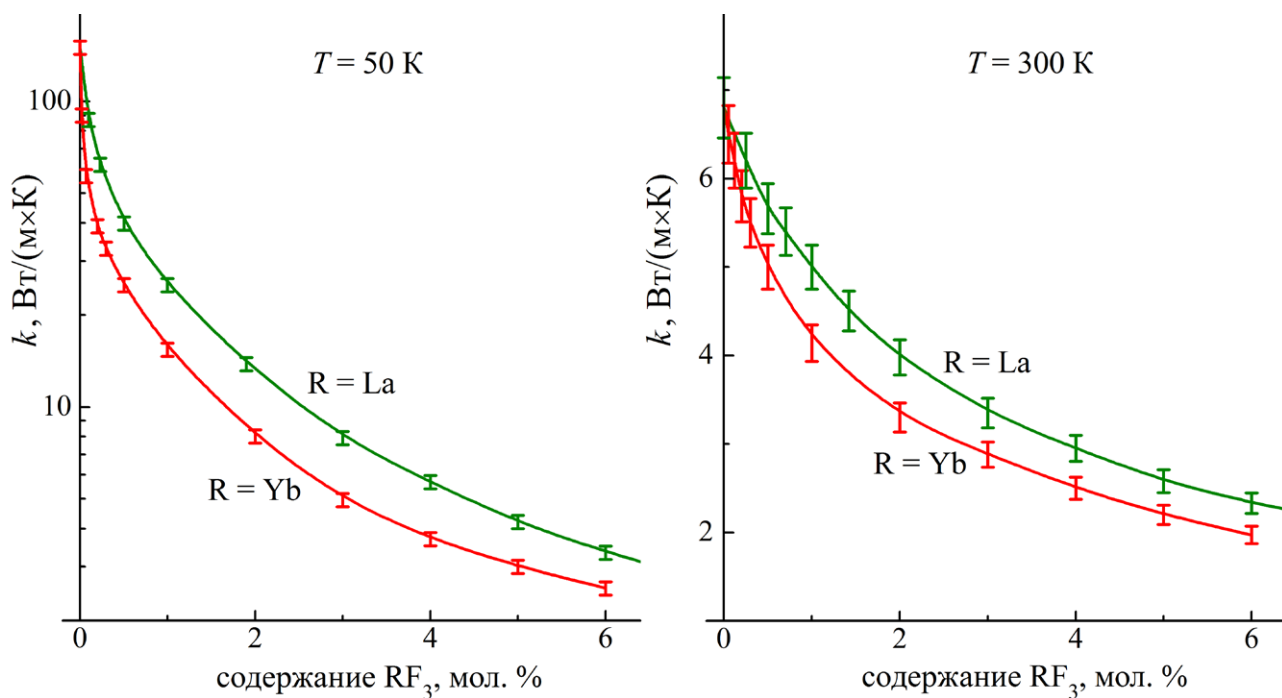


Рис. 4. Сравнение концентрационных зависимостей теплопроводности твердых растворов $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ и $Ba_{1-x}Yb_xF_{2+x}$ (вертикальные рамки соответствуют погрешности измерений теплопроводности $\pm 5\%$)

метры D , B и C – коэффициенты полинома, описывающего «аморфную составляющую» коэффициента теплопроводности и они не имеют явного физического смысла.

Аппроксимация экспериментальных данных позволила достичь согласия с соответствующими расчетными значениями $k(T)$ при $\beta = 1$. В качестве коэффициента k_0 для номинально чистого кристалла BaF_2 было использовано аппроксимирующее выражение вида:

$$k_0 = 1.49 + 1184 \exp\left(\frac{91.6}{T}\right) T^{-1} \quad (2).$$

Значения параметров A , B , C , и D для разных составов приведены в табл. 2. Графики их концентрационных зависимостей представлены на рис. 5. Видно, что основные изменения значений этих параметров происходят в пределах концентрации $0 < x < 10$ мол. %. Заметим, что при концентрациях лантана более 10 мол. % температур-

Таблица 2. Значения параметров A , B , C и D , входящих в выражение 1

Содержание LaF_3 , мол. %	A	C , Вт·м ⁻¹ ·К ⁻³	B , Вт·м ⁻¹ ·К ⁻²	D , Вт·м ⁻¹ ·К ⁻¹
0.1	0.10	$1.099 \cdot 10^{-4}$	$-5.841 \cdot 10^{-2}$	11.33
0.5	0.15	$1.137 \cdot 10^{-4}$	$-5.503 \cdot 10^{-2}$	9.599
1	0.22	$1.030 \cdot 10^{-4}$	$-5.068 \cdot 10^{-2}$	9.056
2	0.33	$5.769 \cdot 10^{-5}$	$-2.848 \cdot 10^{-2}$	5.762
3	0.40	$2.823 \cdot 10^{-5}$	$-1.452 \cdot 10^{-2}$	3.849
4	0.45	$1.510 \cdot 10^{-5}$	$-8.498 \cdot 10^{-3}$	3.013
5	0.51	$2.453 \cdot 10^{-6}$	$-1.978 \cdot 10^{-3}$	1.835
8	0.56	$1.732 \cdot 10^{-6}$	$-7.156 \cdot 10^{-4}$	1.338
10	0.60	$5.520 \cdot 10^{-7}$	$6.453 \cdot 10^{-5}$	1.105
13	0.63	$6.887 \cdot 10^{-7}$	$2.401 \cdot 10^{-4}$	0.9337
20	0.70	$1.993 \cdot 10^{-6}$	$-1.892 \cdot 10^{-4}$	0.8403
25	0.73	$2.161 \cdot 10^{-6}$	$1.266 \cdot 10^{-5}$	0.6490
30	0.76	$-1.088 \cdot 10^{-6}$	$8.417 \cdot 10^{-4}$	0.5947

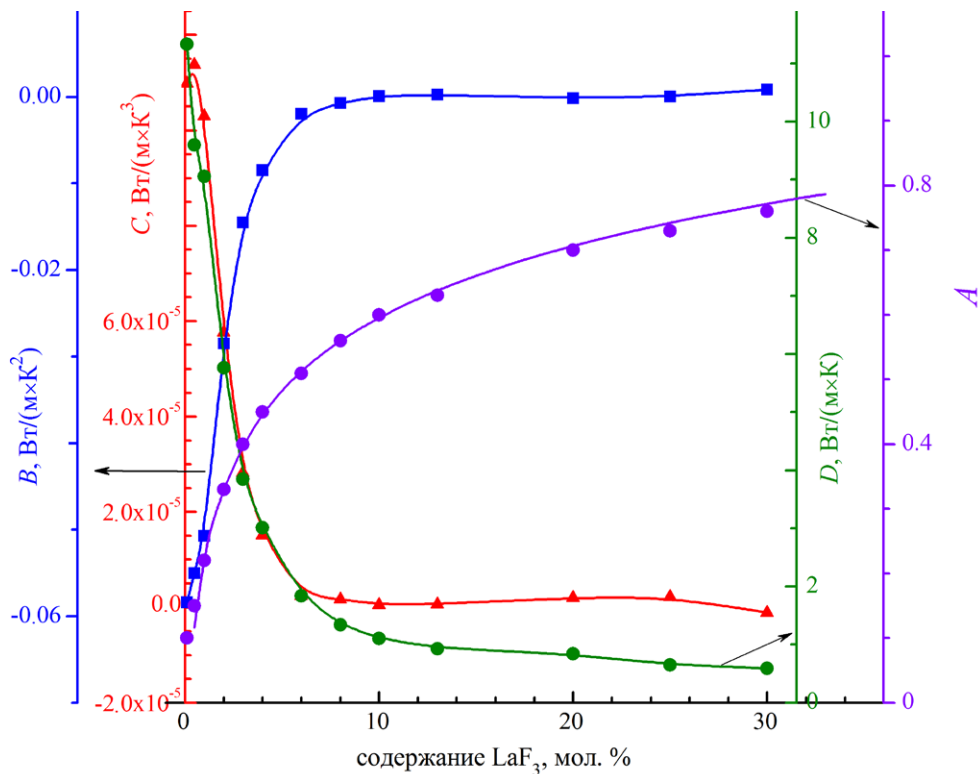


Рис. 5. Концентрационные зависимости коэффициентов полинома A , B , C и D , описывающего «аморфную составляющую»

ные зависимости теплопроводности кристаллов $Ba_{1-x}La_xF_{2+2x}$ практически исчезают.

Для аппроксимации значений параметра $A(d)$ подошло формульное выражение $A = 1 + 0.16 \cdot \ln(0.8d)$. Его наибольшее значение, очевидно, ниже $A_{\max} = 1$, что соответствует заложенному физическому смыслу этого параметра.

4. Заключение

Впервые в интервале температур 50–300 К экспериментально исследована теплопроводность монокристаллических образцов гетеровалентного твердого раствора $Ba_{1-x}La_xF_{2+2x}$ ($0 \leq x \leq 0.30$). Было отмечено, что с увеличением содержания La величина теплопроводности монотонно снижается, а ее температурная зависимость переходит от сильной убывающей к слабой возрастающей. Образцы с высоким содержанием лантана продемонстрировали значения теплопроводности, характерные для оптических стёкол. Экспериментальные результаты с хорошей точностью были описаны полуэмпирическим выражением, учитывающим вклад в тепловое сопротивление гетеровалентного твердого раствора его кристаллической и «аморфной» составляющих. Экспериментально определенные в интервале температур (от азотной до комнатной) значения коэффициента теплового расширения кристаллов $Ba_{1-x}La_xF_{2+2x}$ имеют ощутимые отличия от КТР матрицы BaF_2 только при низких температурах.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Schotanus P., Dorenbos P., van Eijk C. W. E., Lamfers H. J. Suppression of the slow scintillation light output of BaF_2 crystals by La^{3+} doping. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. A*. 1989;281(1): 162–166. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(89\)91229-1](https://doi.org/10.1016/0168-9002(89)91229-1)
2. Herweg K., Nadig V., Schulz V., Gundacker S. On the prospects of BaF_2 as a fast scintillator for Time-of-Flight positron emission tomography systems. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*. 2023;7(3): 241–252. <https://doi.org/10.1109/TRPMS.2023.3237254>
3. Belov M. V., Zavertyaev M. V., Kozlov V. A., Tskhay V. S. Scintillation properties of electromagnetic calorimeter

modules based on BaF_2 crystals. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. 2024;51(8): 273–277. <https://doi.org/10.3103/S1068335624600475>

4. Wojtowicz J., Glodoay J., Wisniewski D., Lempicki A. Scintillation mechanism in RE-activated fluorides. *Journal of Luminescence*. 1997;72–74: 731–733. [https://doi.org/10.1016/S0022-2313\(97\)80790-9](https://doi.org/10.1016/S0022-2313(97)80790-9)
5. Владимиров С. В., Кафтанов В. С., Нилов А. Ф., ... Скворцов В. Н. Сцинтилляционные характеристики кристаллов BaF_2 . *Атомная энергия*. 2001;90(1): 49–55. <https://doi.org/10.1023/A:1011391923801>
6. Shendrik R., Radzhabov E., Myasnikova A., ... Pankratov V. Ultrafast core-to-core luminescence in BaF_2 – LaF_3 single crystals. *Scientific Reports*. 2025;15: 26558. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11505-w>
7. Nepomnyashchikh A. I., Radzhabov E. A., Egranov A. V., Ivashchkin V. F. Luminescence of BaF_2 – LaF_3 . *Radiation Measurements*. 2001;33: 759–762. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(01\)00101-9](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(01)00101-9)
8. Radzhabov E. A., Shalaev A., Nepomnyashikh, A. I. Exciton luminescence suppression in BaF_2 – LaF_3 solid solutions. *Radiation Measurements*. 1998;29(3–4): 307–309. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(98\)00048-1](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(98)00048-1)
9. Madirov E. I., Kuznetsov S. V., Konyushkin V. A., Busko D., Richards B. S., Turshatov A. Pushing the limits: down-converting Er^{3+} -doped BaF_2 single crystals with photoluminescence quantum yield surpassing 100%. *Advanced Optical Materials*. 2024;12(16): 2303094. <https://doi.org/10.1002/adom.202303094>
10. Kaminskii A. A. *Laser crystals, their physics and properties*. In: Springer Series in Optical Sciences. Berlin: Springer; 1990, vol. 14, 2nd ed. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-70749-3>
11. Lu Z., Zhang Z., Jiang D., ... Su L. Thermo-mechanical properties and laser-induced damage behaviors in NYCF and NYSF crystals with different orientations. *Optics Express*. 2025;33(16): 33153–33168. <https://doi.org/10.1364/OE.566275>
12. Кузнецов С. В., Александров А. А., Федоров П. П. Фторидная оптическая нанокерамика. *Неорганические материалы*. 2021;57(6): 583–607. <https://doi.org/10.31857/S0002337X21060075>
13. Sorokin N. I., Breiter M. W. Anionic conductivity and thermal stability of single crystals of solid solutions based on barium fluoride. *Solid State Ionics*. 1997;99(3–4): 241–250. [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(97\)00190-2](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(97)00190-2)
14. Ivanov-Shits A. K., Sorokin N. I., Fedorov P. P., Sobolev B. P. Specific features of ion transport in nonstoichiometric fluorite-type $Ba_{1-x}R_xF_{2+2x}$ ($R=La-Lu$ phases). *Solid State Ionics*. 1989;31(4): 269–280. [https://doi.org/10.1016/0167-2738\(89\)90466-9](https://doi.org/10.1016/0167-2738(89)90466-9)
15. Preishuber-Pflügl F., Bottke P., Pregartner V., Bitschnau B., Wilkening M. Correlated fluorine diffusion and ionic conduction in the nanocrystalline F^- solid electrolyte $Ba_{0.6}La_{0.4}F_{2.4}$ – ^{19}F $T_{1(\rho)}$ NMR relaxation vs. conductivity measurements. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2014;16(20): 9580–9590. <https://doi.org/10.1039/C4CP00422A>
16. Rammutla K. E., Comins J. D. High temperature raman scattering studies of $Ba_{1-x}La_xF_{2+2x}$. *Radiation Effects and Defects in Solids*. 1999;150(1–4): 347–353. <https://doi.org/10.1080/10420159908226255>

17. Den Hartog H. W., Langevoort J. C. Ionic thermal current of concentrated cubic solid solutions of SrF_2 : LaF_3 and BaF_2 : LaF_3 . *Physical Review B*. 1981;24(6): 3547–3554. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.24.3547>
18. Den Hartog H. W., Pen K. F., Meuldijk J. Defect structure and charge transport in solid solutions $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$. *Physical Review B*. 1983;28(10): 6031–6040. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.28.6031>
19. Laredo E., Suarez N., Bello A., Puma M., Figueroa D., Schoonman J. Dislocation polarization and space-charge relaxation in solid solutions $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$. *Physical Review B*. 1985;32(12): 8325–8331. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.32.8325>
20. Wapenaar K. E. D., Koesveld J. L., Schoonman J. Conductivity enhancement in fluorite-structured $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ solid solutions. *Solid State Ionics*. 1981;2(3): 145–154. [https://doi.org/10.1016/0167-2738\(81\)90172-7](https://doi.org/10.1016/0167-2738(81)90172-7)
21. Ivanov-Shits A. K., Sorokin N. I., Fedorov P. P., Sobolev B. P. Specific features of ion transport in nonstoichiometric $\text{Sr}_{1-x}\text{R}_x\text{F}_{2+x}$ phases (R=La-Lu, Y) with the fluorite-type structure. *Solid State Ionics*. 1989;31(4): 253–268. [https://doi.org/10.1016/0167-2738\(89\)90465-7](https://doi.org/10.1016/0167-2738(89)90465-7)
22. Trnovcova V., Sorokin N. I., Fedorov P. P., Krivandina E. A., Šramkova T., Sobolev B. P. Electrical properties of heavily doped fluorite-structured BaF_2 : RF_3 (R=rare earth element, Y, Sc) single crystals. *Ionics*. 2000;6(5): 351–358. <https://doi.org/10.1007/BF02374152>
23. Munnangi R., Mohammad I., Fichtner M. Room temperature fluoride ion batteries. *ECS Meeting Abstracts, Vol. MA2019-01, A02-Lithium Ion Batteries and Beyond*. 346. <https://doi.org/10.1149/MA2019-01/2/346>
24. Rongeat C., Munnangi A. R., Witter R., Fichtner M. Nanostructured fluorite-type fluorides as electrolytes for fluoride ion batteries. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2013;117(10): 4943–4950. <https://doi.org/10.1021/jp3117825>
25. Astruc A., Celerier S., Pavon E., Mamede A.-S., Delevoye L., Brunet S. Mixed $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ fluoride materials as catalyst for the gas phase fluorination of 2-chloropyridine by HF. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2017;204: 107–118. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.11.019>
26. Акчуринов М. Ш., Гайнутдинов Р. В., Смолянский П. Л., Федоров П. П. Аномально высокая вязкость разрушения оптического флюорита Суранского месторождения (Ю. Урал). *Доклады РАН, физика*. 2006;406(2): 180–182. <https://doi.org/10.1134/S1028335806010034>
27. Aminov L. K., Kurkin I. N., Kurzin S. P., Gromov I. A., Mamin G. V. Identification of the LaF_6 cubooctahedral clusters in mixed crystals $(\text{BaF}_2)_{1-x}(\text{LaF}_3)_x$ by the electron paramagnetic resonance method. *Physics of the Solid State*. 2007;49 (11): 2086–2090. <https://doi.org/10.1134/S1063783407110121>
28. Aminov L. K., Abdulsabirov R. Y., Korableva S. L., Kurkin I. N., Kurzin S. P. EPR of rare-earth ion clusters in mixed crystals $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ doped with Yb^{3+} Ion. *Applied Magnetic Resonance*. 2005;29(4): 561–568. <https://doi.org/10.1007/BF03166332>
29. Fedorov P. P. Association of point defects in nonstoichiometric $\text{M}_{1-x}\text{R}_x\text{F}_{2+x}$ fluorite-type solid solutions. *Butlletí de les Societats Catalanes de Física, Química, Matemàtiques i Tecnologia*. 1991;12(2): 349–381. Режим доступа: <https://raco.cat/index.php/ButlletíSCFQMT/article/view/221696>
30. Moore D. S., Wright J. C. Laser spectroscopy of defect chemistry in CaF_2 :Er. *The Journal of Chemical Physics*. 1981;74: 1626–1636. <https://doi.org/10.1063/1.441303>
31. Kazanskii S. A., Ryskin A. I., Nikiforov A. E., Zaharov A. Y., Ougrumov M. Y., Shakurov G. S. EPR spectra and crystal field of hexamer rare-earth clusters in fluorites. *Physical Review B*. 2005;72(1): 014127. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.014127>
32. Liu K., Bian G., Zhang Z., Ma F., Su L. Modelling and analyzing the glass-like heat transfer behavior of rare-earth doped alkaline earth fluoride crystals. *CrystEngComm*. 2022;24(37): 6468–6476. <https://doi.org/10.1039/D2CE00698G>
33. Попов П. А., Щелоков А. В., Федоров П. П. Расчетная модель температурной зависимости теплопроводности нанокмозитов - гетеровалентных твердых растворов $\text{M}_{1-x}\text{R}_x\text{F}_{2+x}$, где М – щелочноземельные, R – редкоземельные элементы. *Наносистемы: физика, химия, математика*. 2024;15(2): 255–259. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2024-15-2-255-259>
34. Kaczmarek S. M., Tsuboi T., Ito M., Boulon G., Leniec G. Optical study of $\text{Yb}^{3+}/\text{Yb}^{2+}$ conversion in CaF_2 crystals. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2005;17(25): 3771–3786. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/17/25/005>
35. Angervaks A. E., Shcheulin A. S., Ryskin A. I., ... Fedorov P. P. Di- and trivalent ytterbium distributions along a melt-grown CaF_2 crystal. *Inorganic Materials*. 2014;50(7): 733–737. <https://doi.org/10.1134/S0020168514070024>
36. Савчук Р. Н., Нагорный П. Г., Компаниченко Н. М., Омельчук А. А. Восстановление фторидов редкоземельных элементов цирконием. *Журнал неорганической химии*. 2003;48(10): 1596–1600. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17315212>
37. Азаров В. В., Скоробогатов Б. С. Восстановление редкоземельных ионов в LaF_3 монокристаллах. *Известия АН СССР. Неорганические материалы*. 1968;4(10): 1792–1793.
38. Kaminskii A. A., Osico V. V., Prokhorov A. M., Voronko Yu. K. Spectral investigation of the stimulated radiation of Nd^{3+} in CaF_2 - YF_3 . *Physics Letters*. 1966;22(4): 419–421. [https://doi.org/10.1016/0031-9163\(66\)91208-X](https://doi.org/10.1016/0031-9163(66)91208-X)
39. Kitajima S., Yamakado K., Shirakawa A., Ueda K., Ezura Y., Ishizawa H. Yb^{3+} -doped CaF_2 - LaF_3 ceramics laser. *Optics Letters*. 2017;42(9): 1724–1727. <https://doi.org/10.1364/OL.42.001724>
40. Novikov V. V., Matovnikov A. V., Avdashchenko D. V., ... Shevelkov A. V. Low-temperature structure and lattice dynamics of the thermoelectric clathrate $\text{Sn}_{24}\text{P}_{19.3}\text{I}_8$. *Journal of Alloys and Compounds*. 2012;520: 174–179. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.12.171>
41. Попов П. А., Сидоров А. А., Кул'ченков Е. А., ... Федоров П. П. Thermal conductivity and expansion of PbF_2 single crystal. *Ionics*. 2017;23(1): 233–239. <https://doi.org/10.1007/s11581-016-1802-2>
42. Sobolev B. P., Tkachenko N. L. Phase diagrams of BaF_2 -(Y, Ln) F_3 systems. *Journal of the Less Common Metals*. 1982;85: 155–170. [https://doi.org/10.1016/0022-5088\(82\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0022-5088(82)90067-4)
43. Сидоров А. А., Попов П. А., Аксенов С. В., Бегунов А. И., Федоров П. П. Тепловое расширение твердых

растворов на основе фторидов кальция и бария. *Неорганические материалы*. 2013;49(5): 554–556. <https://doi.org/10.7868/S0002337X13040143>

44. White G. K. Thermal expansion at low temperatures of the alkaline earth fluorides and PbF_2 . *Journal of Physics C: Solid State Physics*. 1980;13(26): 4905–4913. <https://doi.org/10.1088/0022-3719/13/26/012>

45. Cahill D. G., Pohl R. O. Low-energy excitations in the mixed crystal $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$. *Physical Review B*. 1989;39: 10477–10480. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.39.10477>

46. Cahill D. G., Watson S. K., Pohl R. O. Lower limit to the thermal conductivity of disordered crystals. *Physical Review B*, 1992;46(10): 6131–6140. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.46.6131>

47. Попов П. А., Моисеев Н. В., Филимонова А. В., ... Миронов И. А. Теплопроводность монокристаллических и керамических образцов на основе LaF_3 . *Неорганические материалы*. 2012;48(3): 361–366. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17647278>

48. Попов П. А., Федоров П. П., Кузнецов С. В., Конюшкин В. А., Осико В. В., Басиев Т. Т. Теплопроводность монокристаллов твердого раствора $\text{Ba}_{1-x}\text{Yb}_x\text{F}_{2+x}$. *Доклады РАН*. 2008;421(2): 183–185. <https://doi.org/10.1134/S1028335808070045>

49. Моисеев Н. В., Попов П. А., Рейтеров В. М., Федоров П. П. Теплоемкость и термодинамические функции гетеровалентного твердого раствора $\text{Ba}_{0.70}\text{La}_{0.30}\text{F}_{2.30}$. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2010;12(5): 243–246. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15574168>

50. Andeen N. H., Clausen K. N., Kjems J. K., Schoonman J. A Study of the disorder in heavy doped $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ by neutron scattering. *Journal of Physics C: Solid State Physics*. 1986;19(14): 2377–2389. <https://doi.org/10.1088/0022-3719/19/14/004>

51. Попов П. А., Федоров П. П., Конюшкин В. А. Теплопроводность монокристаллов твердых растворов $\text{Ba}_{1-x}\text{R}_x\text{F}_{2+x}$ (R=La, Ce, Nd, Gd). *Кристаллография*. 2017;62(2): 269–274. <https://doi.org/10.7868/S0023476117020229>

52. Попов П. А., Федоров П. П., Конюшкин В. А., Накладов А. Н., Кузнецов С. В., Осико В. В., Басиев Т. Т. Теплопроводность монокристаллов твердого раствора $\text{Sr}_{1-x}\text{Yb}_x\text{F}_{2+x}$. *Доклады РАН*. 2008;421(5): 614–616. <https://doi.org/10.1134/S1028335808080016>

53. Попов П. А., Федоров П. П., Кузнецов С. В., Конюшкин В. А., Осико В. В., Басиев Т. Т. Теплопроводность монокристаллов твердого раствора $\text{Ca}_{1-x}\text{Yb}_x\text{F}_{2+x}$. *Доклады РАН*. 2008;419(5): 615–617. <https://doi.org/10.1134/S102833580804006X>

54. Попов П. А., Федоров П. П., Рейтеров В. М., Миронов И. А., Гарибин Е. А., Осико В. В. Теплопроводность монокристаллов твердых растворов $\text{Ca}_{1-x}\text{Er}_x\text{F}_{2+x}$ и $\text{Ca}_{1-x}\text{Tm}_x\text{F}_{2+x}$. *Доклады РАН*. 2012;443(3): 304–306. <https://doi.org/10.1134/S1028335812030111>

55. Попов П. А., Федоров П. П., Гарибин Е. А., Смирнов А. Н., Гусев П. Е. Теплопроводность оптической керамики $\text{Ca}_{1-x}\text{Ho}_x\text{F}_{2+x}$. *Неорганические материалы*. 2012;48(8): 973–976. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17745547>

56. Попов П. А., Федоров П. П., Осико В. В. Теплопроводность монокристаллов твердого раствора $\text{Ca}_{1-x}\text{Y}_x\text{F}_{2+x}$.

Доклады РАН. 2014;456(1): 32–35. <https://doi.org/10.7868/S0869565214130106>

57. Попов П. А., Федоров П. П., Конюшкин В. А. Теплопроводность гетеровалентных твердых растворов $\text{Ca}_{1-x}\text{R}_x\text{F}_{2+x}$ (R = La, Ce, Pr, $0 \leq x \leq 0.25$). *Кристаллография*. 2015;60(5): 810–815. <https://doi.org/10.7868/S0023476115050100>

58. Sergeev O. A., Shashkov A. G., Umanskii A. S. Thermophysical properties of quartz glass. *Journal of Engineering Physics*. 1982;43(6): 1375–1383. <https://doi.org/10.1007/BF00824797>

59. Wapenaar K. E. D., Van Koesveld J. L., Schoonman J. Conductivity enhancement in fluorite-structured $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ solid solutions. *Solid State Ionics*. 1981;2(3): 145–154. [https://doi.org/10.1016/0167-2738\(81\)90172-7](https://doi.org/10.1016/0167-2738(81)90172-7)

60. Trnovcova V., Garashina L. S., Skubla A., ... Sobolev B. P. Structural aspects of fast ionic conductivity of rare earth fluorides. *Solid State Ionics*. 2003;157(1-4): 195–201. [https://doi.org/10.1016/S0167-2738\(02\)00209-6](https://doi.org/10.1016/S0167-2738(02)00209-6)

61. Hull S. Superionics: crystal structures and conduction. *Reports on Progress in Physics*. 2004;67(7): 1233–1314. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/67/7/R05>

62. Düvel A., Bednarcik J., Šepelák V., Heitjans P. Mechanosynthesis of the fast fluoride ion conductor $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$: from the fluorite to the tysonite structure. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2014;118(13): 7117–7129. <https://doi.org/10.1021/jp410018t>

63. Sobolev B. P., Sorokin N. I., Bolotina N. B. Nonstoichiometric single crystals $\text{M}_{1-x}\text{R}_x\text{F}_{2+x}$ and $\text{R}_{1-y}\text{M}_y\text{F}_{3-y}$ (M = Ca, Sr, Ba; R = rare earth elements) as fluoride-ionic conductive solid electrolytes. In: *Photonic & Electronic Properties of Fluoride Materials*. Tressaud A., Poepelmeier K. (ed.). Elsevier; 2016. pp. 465–491. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801639-8.00021-0>

64. Gschwind F., Rodrigues-Garsia G., ... Hörmann N. Fluoride ion batteries: theoretical performance, safety, toxicity, and a combinatorial screening of new electrodes. *Journal of Fluorine Chemistry*. 2016;182: 76–90. <https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2015.12.002>

65. Cheng X., Wang S., Lin X. Preparation and electrochemical properties of $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ fluoride electrolyte. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;678: 012148. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/678/1/012148>

66. Nikolaichik V. I., Sobolev B. P., Sorokin N. I., Avilov A. S. Electron diffraction study and ionic conductivity of fluorite $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ and tysonite $\text{La}_{1-y}\text{Ba}_y\text{F}_{3-y}$ phases in the BaF_2 - LaF_3 system. *Solid State Ionics*. 2022;386: 116052. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2022.116052>

67. Сорокин Н. И. Концентрация и подвижность носителей заряда в суперионном проводнике $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ ($0.05 \leq x \leq 0.5$). *Физика твердого тела*. 2024;66(1): 56–62. <https://doi.org/10.61011/FTT.2024.01.56937.253>

68. Andersen N. H., Clausen K. N., Kjems J. K., Schoonman J. A study of the disorder in heavily doped $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$ by neutron scattering, ionic conductivity and specific heat measurements. *Journal of Physics C: Solid State Physics*. 1986;19(14): 2377–2389. <https://doi.org/10.1088/0022-3719/19/14/004>

69. Федоров П. П., Сорокин Н. И., Попов П. А. Обратная корреляция ионной проводимости и теплопроводности монокристаллов твердых растворов $\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{F}_{2+x}$

П. А. Попов др. Полужемпирическое описание закономерности изменения теплопроводности монокристаллов...

(M = Ca, Ba, R –редкоземельные элементы) флюоритовой структуры. *Неорганические материалы*. 2017;53(6): 639–645. <https://doi.org/10.7868/S0002337X17060033>

70. Сорокин Н. И., Каримов Д. Н. Кристаллофизическая модель ионного переноса в монокристаллах супериоников $Ba_{1-x}La_xF_{2+x}$ и $Ca_{1-x}Y_xF_{2+x}$. *Физика твердого тела*. 2021;63(10): 1485–1495. <https://doi.org/10.21883/FIT.2021.10.51477.096>

71. Попов П. А., Щелоков А. В., Конюшкин В. А., Накладов А. Н., Федоров П. П. Применение численной модели температурозависимой теплопроводности в гетероалентных нанокompозитах твердого раствора $Ca_{1-x}Y_xF_{2+x}$. *Наносистемы: физика, химия, математика*. 2025;16(1):67–73. <https://doi.org/10.17586/2220-8054-2025-16-1-67-73>

72. Shannon R. D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interaction distance in halides and chalcogenides. *Acta Crystallographica Section A*. 1976;32(5): 751–767. <https://doi.org/10.1107/S0567739476001551>

73. Попов П. А., Щелоков А. В., Зенцова А. А., Александров А. А., Чернова Е. В., Федоров П. П. Теплопроводность монокристаллов твердого раствора $Ca_{1-x-y}Sr_xNd_yF_{2+y}$. *Неорганические материалы*. 2024;60(5): 590–600. <https://doi.org/10.31857/S0002337X24050082>

Информация об авторах

Попов Павел Аркадьевич, д. ф.-м. н., профессор кафедры экспериментальной и теоретической физики, Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского (Брянск, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-7555-1390>
tfbgubry@mail.ru

Щелоков Александр Владимирович, аспирант кафедры экспериментальной и теоретической физики, Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского (Брянск, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0009-0001-4090-2506>
alexandershchelokov@mail.ru

Митрошенков Николай Васильевич, к. ф.-м. н., заведующий кафедрой экспериментальной и теоретической физики, Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского (Брянск, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-4418-9613>
weerm@yandex.ru

Кушнерёва Алена Андреевна, магистрант кафедры экспериментальной и теоретической физики, Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского (Брянск, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-9793-7099>
alenzen01@mail.ru

Конюшкин Василий Андреевич, с. н. с., Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-6028-8937>
vasil@lst.gpi.ru

Накладов Андрей Николаевич, м. н. с., Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-4060-8091>
andy-nak@yandex.ru

Федоров Павел Павлович, д. х. н., гл. н. с., Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-2918-3926>
ppfedorov@yandex.ru

Кузнецов Сергей Викторович, к. х. н., вед. н. с., Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (Москва, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-7669-1106>
kouznetzovsv@gmail.com

Поступила в редакцию 18.09.2025; одобрена после рецензирования 13.10.2025; принята к публикации 15.10.2025; опубликована онлайн 01.04.2026.