

Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 546.161 + 548.55

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3310>

Выращивание и физические свойства монокристаллов CaSrBaF_6

С. Н. Ушаков^{1,2}, М. А. Усламина¹, А. А. Пыненков¹, В. П. Мишкин¹, К. Н. Нищев¹,
С. В. Кузнецов², Е. В. Чернова², П. П. Федоров² ✉

¹Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева,
ул. Большевикская, д. 6, Саранск 8430005, Республика Мордовия, Российская Федерация

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

Аннотация

Методом Бриджмена–Стокбаргера выращены кристаллы тройного фторида $\text{CaF}_2\text{–SrF}_2\text{–BaF}_2$ в области составов, близких к CaSrBaF_6 . Диаметр кристаллов 10–12 мм, длина 50–60 мм. Кристалл CaSrBaF_6 является новым оптическим материалом, прозрачным в среднем ИК-, видимом, и УФ-диапазоне. Неравномерность распределения компонентов по длине кристалла не превышает 10 %. Край полосы поглощения в ИК области составляет 14.3 мкм, оптическое поглощение на длине волны 200 нм не превышает 18 % (менее 0.2 см^{-1}). Коэффициенты преломления для длин волн 633, 969, 1539 нм составили 1.4527, 1.4488, 1.4458 соответственно. Кристалл плавится в интервале температур 1150–1210 °С. Состав CaSrBaF_6 является подходящей матрицей для легирования редкоземельными ионами для получения функциональных монокристаллических и керамических материалов видимого и ИК-диапазонов.

Ключевые слова: фторид кальция, фторид стронция, фторид бария, флюорит, твердый раствор, изоморфизм, высокоэнтропийные сплавы

Благодарности: работа была выполнена с использованием оборудования ЦКП «Материаловедение» ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарева».

Для цитирования: Ушаков С. Н., Усламина М. А., Пыненков А. А., Мишкин В. П., Нищев К. Н., Кузнецов С. В., Чернова Е. В., Федоров П. П. Выращивание и физические свойства монокристаллов CaSrBaF_6 . *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(1): 101–107. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3310>

For citation: Ushakov S. N., Uslamina M. A., Pynenkov A. A., Mishkin V. P., Nishchev K. N., Kuznetsov S. V., Chernova E. V., Fedorov P. P. Growth and physical properties of CaSrBaF_6 single crystals. *Kondensirovannyye sredy i mezhfaznyye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2021;23(1): 101–107. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3310>

✉ Федоров Павел Павлович, e-mail: ppfedorov@yandex.ru

© Ушаков С. Н., Усламина М. А., Пыненков А. А., Мишкин В. П., Нищев К. Н., Кузнецов С. В., Чернова Е. В., Федоров П. П., 2021



1. Введение

Фториды кальция, стронция и бария кристаллизуются в структуре типа флюорита с параметрами кристаллической решетки – 5.463, 5.800 и 6.200 Å соответственно. Монокристаллы дифторидов щелочноземельных металлов широко применяются в качестве материалов фотоники [1–3], в том числе как матрицы для легирования редкоземельными ионами [4–10]. Они характеризуются широкими областями пропускания от вакуумного ультрафиолета до среднего ИК-диапазона. Однако использование чистых фторидов наталкивается на ограничения при дизайне оптических систем [11]. Использование твердых растворов позволяет варьировать физические свойства и характеристики матриц в широких пределах. В системах CaF_2 – SrF_2 [12, 13] и SrF_2 – BaF_2 [14, 15] образуются непрерывные области твердых растворов с точками минимумов на кривых плавления. Выращены и исследованы соответствующие серии монокристаллов $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{F}_2$ и $\text{Sr}_{1-x}\text{Ba}_x\text{F}_2$ [16–22]. Изоморфизм в системе CaF_2 – BaF_2 ограничен [18, 23, 24]. Соответствующие бинарные твердые растворы представляют интерес в качестве оптических материалов фотоники. При образовании изовалентных твердых растворов существенно (по сравнению с компонентами) меняются физические свойства кристаллов, в том числе показатель преломления [16–18, 20], колебательные спектры [25] и твердость [17, 20]. Механические характеристики твердых растворов в целом улучшаются, теплопроводность падает, электропроводность возрастает. Спектрально-люминесцентные характеристики и кластерное строение легирующих ионов РЗЭ меняется немонотонно [26–29].

В последние годы возрос интерес к многокомпонентным фазам, содержащим в своем составе несколько изоструктурных элементов. Такие составы, содержащие 5 и более компонентов, получили название высокоэнтропийных сплавов (high-entropy alloys, HEAs) [30, 31]. В соответствии с третьим началом термодинамики такие однофазные сплавы не могут быть стабильны при низких температурах, однако исключительно медленные процессы атомной диффузии и фазовой релаксации позволяют в некоторых случаях говорить об их кинетической устойчивости и потенциальных приложениях. Однородные материалы многокомпонентного состава обычны в стеклах [32]. Первоначально такое наименование относилось к металлическим сплавам, но появились также оксидные HEAs [33]. Сооб-

щалось о синтезе высокоэнтропийной фторидной керамики CeNdCaSrBaF_{12} [34].

Целью данной работы было выращивание монокристаллов трехкомпонентного твердого раствора $\text{Ca}_{1-x-y}\text{Sr}_x\text{Ba}_y\text{F}_2$ в окрестности состава CaSrBaF_6 и исследование его свойств. Соответствующий состав может быть матрицей для легирования редкоземельными ионами и получения многокомпонентного функционального материала.

2. Методика эксперимента

В качестве исходных веществ для выращивания кристаллов CaF_2 – SrF_2 – BaF_2 был использован лом оптических монокристаллов CaF_2 (ОСТ 3-6304-87) и BaF_2 и переплавленный порошок SrF_2 («ос.ч.»). Выбор кристаллических реактивов, как и переплавленного во фторирующей атмосфере порошка, предпочтителен, так как реактивы не поглощают влагу и долго хранятся. Каждый исходный реагент контролировался методами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), рентгенофазового анализа (РФА), и электронной микроскопии.

Кристаллы тройного фторида CaF_2 – SrF_2 – BaF_2 в области составов, близких к CaSrBaF_6 , были выращены на автоматизированной установке «НИКА-3» в условиях индукционного нагрева шестиячеистого графитового тигля, помещенного внутри индуктора. Температурный градиент формировался с помощью экранов, в качестве которых выступали графитовые трубы и диски, которые имели радиальные пропилы для исключения нагрева индукционными токами, что позволило получить температурный градиент (по стенке тигля) около 30 °С/см. Измерение температуры производили ручным ИК-пирометром через окна камеры. После наполнения тигля шихтой производилась откачка до остаточного давления не более $5 \cdot 10^{-2}$ мбар. В качестве фторирующего агента выступает газ CF_4 , которым частично наполняется камера. После этого включается плавный нагрев до рабочей температуры (1.5–2 часа) и после ее достижения производилось перемещение тигля из горячей зоны в холодную со скоростью 6 мм/час. После завершения процесса перемещения тигля проводилось медленное охлаждение в течение 4–6 часов.

Термический анализ образцов кристаллов проводился на дифференциальном сканирующем калориметре Netzsch DSC 404 F1. Измерения проводились в платиновых тиглях в атмо-

сфере проточного аргона. В качестве образцов использованы измельченные осколки затравочного конуса були. Термический анализ для всех кристаллов проводился в диапазоне температур 20–1400 °С в режиме двух циклов нагрев-охлаждение.

Коэффициент преломления образцов кристаллов измерялся на рефрактометре Metricon 2010. Методика измерения базируется на определении критического угла падения, при котором свет начинает проходить в объем образца через поверхность измерительной призмы (аналогично рефрактометру Аббе). Данный прибор позволяет проводить измерение на трех длинах волн: 633, 969 и 1539 нм. Измерения проводились на образцах кристаллов с полированной боковой поверхностью в области 5–10 мм от затравочного конуса кристалла.

Для регистрации оптического пропускания в УФ, видимой и ИК областях оптического спектра использовались спектрофотометры Shimadzu UV-2600 и Инфралюм ФТ 02 соответственно. В УФ и видимой области измерения проводили по двухлучевому методу, а в ИК области по однолучевому. Измерения проводились на образцах с двумя полированными боковыми поверхностями в области 5–10 мм от затравочного конуса були.

Исследование элементного состава кристаллов проводилось на растровом электронном микроскопе Quanta 200i 3D FEI с системой энергодисперсионного микроанализа, которая включает энергодисперсионный кремниевый детектор Apollo X с разрешением > 131 эВ для линии MnK при 100000 имп/с. Соотношение пик/фон не менее 10000/1. Концентрация компонентов кристаллов измерялась в трех областях по длине кристалла на расстоянии 1 мм, 20 мм и 40 мм от затравочного конуса були. В каждой области проведено три измерения в различных точках и эти данные усреднялись.

3. Результаты и обсуждение

Выращена серия кристаллов диаметром 10–12 мм и длиной 50–60 мм (рис. 1). Кристаллы оптически прозрачны (рис. 2). Неравномерность распределения компонентов кристалла по длине були для большинства кристаллов не превышает 10 %. Наилучшая равномерность наблюдается на кристалле состава CaSrBaF_6 (33 мол. % CaF_2 – 33 мол. % SrF_2 – 33 мол. % BaF_2), рис. 3.

Кривые ДСК для образца кристалла состава CaSrBaF_6 для первого цикла нагрев-охлаждение

представлены на рис. 4. Образец плавится в интервале температур 1150–1210 °С.

Результаты измерения коэффициента преломления сведены в табл. 1. Максимальные значения коэффициента преломления характерны для образца 31 мол. % CaF_2 – 31 мол. % SrF_2 – 38 мол. % BaF_2 , а минимальные для состава 40.5 мол. % CaF_2 – 33.6 мол. % SrF_2 – 25.9 мол. % BaF_2 .

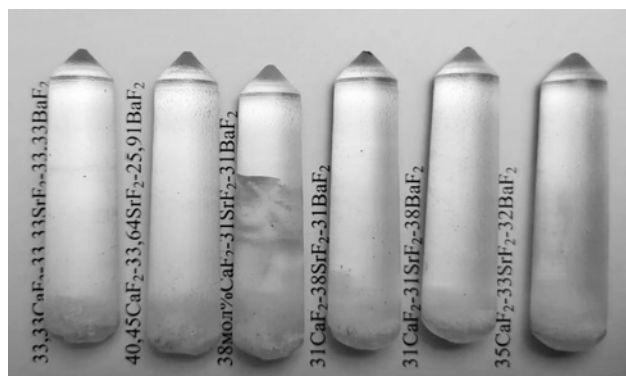


Рис. 1. Фото необработанных буль кристаллов тройного фторида CaF_2 – SrF_2 – BaF_2 в области составов близких CaSrBaF_6

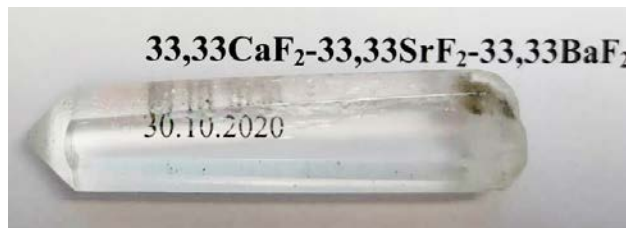


Рис. 2. Фото полированного кристалла тройного фторида CaSrBaF_6

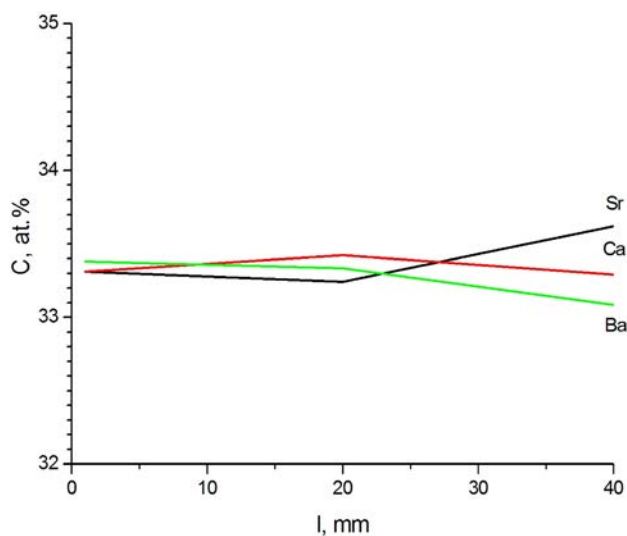
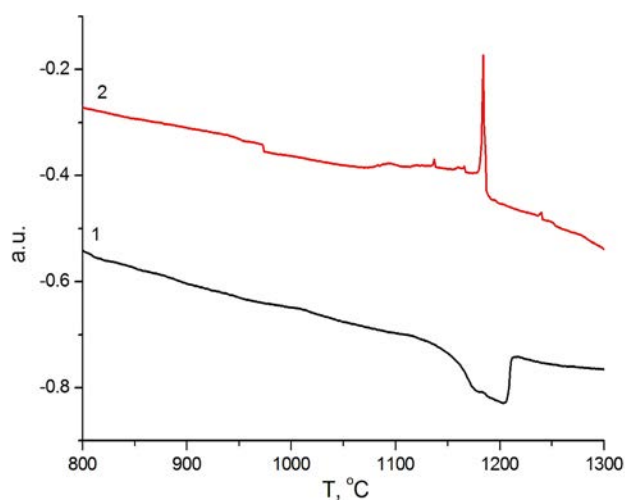


Рис. 3. Распределение компонентов кристалла CaSrBaF_6 по длине були для состава 33 мол. % CaF_2 – 33 мол. % SrF_2 – 33 мол. % BaF_2

Таблица 1. Значения коэффициента преломления n на трех длинах волн для кристаллов тройных фторидов в области составов, близких к CaSrBaF_6

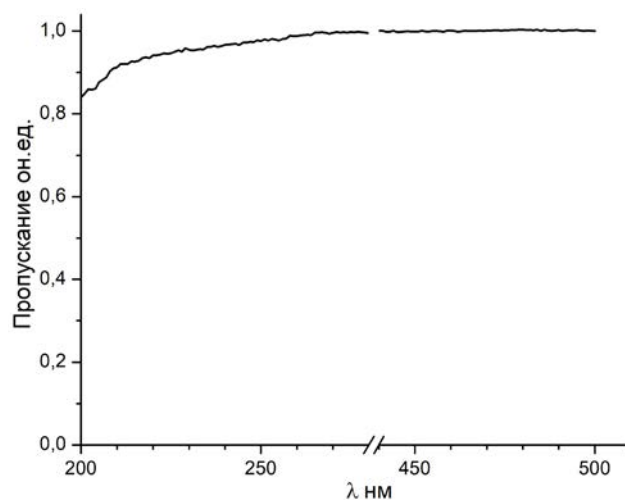
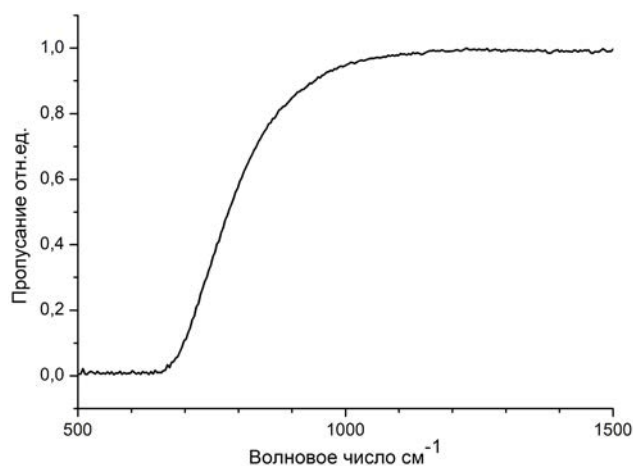
Составы	$\lambda = 633 \text{ нм}$	$\lambda = 969 \text{ нм}$	$\lambda = 1539 \text{ нм}$
33 мол. % CaF_2 – 33 мол. % SrF_2 – 33 мол. % BaF_2	1.4527	1.4488	1.4458
40.5 мол. % CaF_2 – 33.6 мол. % SrF_2 – 25.9 мол. % BaF_2	1.4497	1.4458	1.4430
38 мол. % CaF_2 – 31 мол. % SrF_2 – 31 мол. % BaF_2	1.4522	1.4483	1.4451
31 мол. % CaF_2 – 38 мол. % SrF_2 – 31 мол. % BaF_2	1.4520	1.4472	1.4448
31 мол. % CaF_2 – 31 мол. % SrF_2 – 38 мол. % BaF_2	1.4566	1.4526	1.4491
35 мол. % CaF_2 – 33 мол. % SrF_2 – 32 мол. % BaF_2	1.4527	1.4486	1.4451


Рис. 4. Участки кривых DSC образца кристалла состава 33 мол. % CaF_2 – 33 мол. % SrF_2 – 33 мол. % BaF_2 , первый цикл: 1 – нагрев, 2 – охлаждение

Спектры пропускания для кристалла состава CaSrBaF_6 в области УФ и ИК краев поглощения представлены на рис. 5 и рис. 6 соответственно. Толщина измеряемого образца 10 мм. Спектры приведены с учетом компенсации Френелевского отражения от поверхностей образца. Край УФ поглощения находится за пределами рабочей области спектрофотометра, а на длине волны 200 нм поглощение не превышает 18 % (менее 0.2 см^{-1}).

Граничная область ИК поглощения по уровню пропускания 0.1 начинается с 700 см^{-1} (14.3 мкм). Пропускание 50 % имеет место при 12.5 мкм.

Таким образом, кристалл состава CaSrBaF_6 является новым оптическим материалом, прозрачным в среднем ИК-, видимом и УФ-диапазонах. Большая разница между температурами ликвидуса и солидуса, превышающая $50 \text{ }^\circ\text{C}$, свидетельствует об инконгруэнтном характере плавления этого состава. Соответственно, выращивание из расплава кристаллов CaSrBaF_6 высокого оптического качества, пригодных для лазерных приложений, вряд ли будет реализовано


Рис. 5. Спектр пропускания образца кристалла состава 33 мол. % CaF_2 – 33 мол. % SrF_2 – 33 мол. % BaF_2 в УФ и видимой области. Толщина образца 10 мм

Рис. 6. Спектр пропускания образца кристалла состава 33 мол. % CaF_2 – 33 мол. % SrF_2 – 33 мол. % BaF_2 в ИК области. Толщина образца 10 мм

вследствие проблем с концентрационным переохлаждением, неустойчивостью фронта кристаллизации и образования ячеистой и дендритной субструктуры [35, 36]. Однако этот состав может оказаться подходящей кристаллической матрицей для получения ап-конверсионных люмино-

форов [37] и в технологии получения оптической керамики [38].

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. Юшкин Н. П., Волкова Н. В., Маркова Г. А. *Оптический флюорит*. М.: Наука; 1983. 134 с.

2. Зверев В. А., Кривоустова Е. В., Точилина Т. В. *Оптические материалы. Часть 2. Учебное пособие для конструкторов оптических систем и приборов*. С.-Петербург: ИТМО; 2013. 248 с.

3. Fedorov P. P., Osiko V. V. Crystal growth of fluorides. In: *Bulk Crystal Growth of Electronic, Optical and Optoelectronic Materials*. P. Capper (ed.). Wiley Series in Materials for Electronic and Optoelectronic Applications. John Wiley & Son. Ltd.; 2005. pp. 339–356. <https://doi.org/10.1002/9780470012086.ch11>

4. Kaminskii A.A. Laser crystals. Their physics and properties. In: *Springer Series in Optical Sciences*. Berlin: Springer; 1990. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-70749-3>

5. Siebold M., Bock S., Schramm U., Xu B., Doualan J. L., Camy P., Moncorge R. Yb:CaF₂ – a new old laser crystal. *Applied Physics B*. 2009;97: 327–338. <https://doi.org/10.1007/s00340-009-3701-y>

6. Druon F., Ricaud S., Papadopoulos D. N., Pellegrina A., Camy P., Doualan J. L., Moncorge R., Courjaud A., Mottay E., Georges P. On Yb:CaF₂ and Yb:SrF₂: review of spectroscopic and thermal properties and their impact on femtosecond and high power laser performance. *Optical Materials Express*. 2011;1(3): 489–502. <https://doi.org/10.1364/ome.1.000489>

7. Басиев Т. Т., Орловский Ю. В., Поляченко М. В., Федоров П. П., Кузнецов С. В., Конюшкин В. А., Осико В. В., Алимов О. К., Дергачев А. Ю. Непрерывная генерация с плавной перестройкой длины волны вблизи 2.75 мкм на кристаллах SrF₂:Er³⁺ и CaF₂:Er³⁺ с диодной накачкой. *Квантовая электроника*. 2006;36(7): 591–594. <https://doi.org/10.1070/qe2006v036n07abeh013178>

8. Alimov O. K., Basiev T. T., Doroshenko M. E., Fedorov P. P., Konyushkin V. A., Nakladov A. N., Osiko V. V. Investigation of Nd³⁺ ions spectroscopic and laser properties in SrF₂ fluoride single crystal. *Optical Materials*. 2012;34(5): 799–802. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2011.11.010>

9. Brites C. D. S., Kuznetsov S. V., Konyushkin V. A., Nakladov A. N., Fedorov P. P., Carlos L. D. Simultaneous measurement of the emission quantum yield and local temperature: the illustrative example of SrF₂:Yb³⁺/Er³⁺ single crystals. *European Journal of Inorganic Chemistry*.

2020;2020(17): 1555–1561. <https://doi.org/10.1002/ejic.202000113>

10. Saleta Reiga D., Grauel B., Konyushkin V. A., Nakladov A. N., Fedorov P. P., Busko D., Howard I. A., Richards B. S., Resch-Genger U., Kuznetsov S. V., Turshatov A., Würtha C. Upconversion properties of SrF₂:Yb³⁺, Er³⁺ single crystals. *Journal of Materials Chemistry C*. 2020;8(12): 4093–4101. <https://doi.org/10.1039/c9tc06591a>

11. Barnett J., Levine Z., Shirley E. Intrinsic birefringence in calcium fluoride and barium fluoride. *Physical Review B*. 2001;64(24): 241102. <https://doi.org/10.1103/physrevb.64.241102>

12. Klimm D., Rabe M., Bertram R., Uecker R., Parthier L. Phase diagram analysis and crystal growth of solid solutions Ca_{1-x}Sr_xF₂. *Journal of Crystal Growth*. 2008;310(1): 152–155. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2007.09.031>

13. Стасюк В. А., Бучинская И. И., Устьянцева Н. А., Федоров П. П., Арбенина В. В. Изучение поверхностей ликвидуса и солидуса твердых растворов со структурой флюорита в системе CaF₂–SrF₂–LaF₃. *Журнал неорганической химии*. 1998;43(8): 1372–1375. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13300529>

14. Nafziger R. H. High-temperature phase relations in the system BaF₂–SrF₂. *Journal of the American Ceramic Society*. 1971;54(9): 467. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1971.tb12388.x>

15. Федоров П. П., Ивановская Н. И., Стасюк В. А., Бучинская И. И., Соболев Б. П. Изучение фазовых равновесий в системе SrF₂–BaF₂–LaF₃. *Доклады академии наук*. 1999;366(4): 500–502.

16. Черневская Э. Г. Смешанные двухкомпонентные монокристаллы типа фтористый кальций–фтористый стронций и их оптические свойства. *Оптико-механическая промышленность*. 1960;5: 28–32.

17. Черневская Э. Г. Твердость смешанных монокристаллов типа CaF₂. *Оптико-механическая промышленность*. 1966;7: 51–52.

18. Черневская Э. Г., Ананьева Г. В. О структуре смешанных кристаллов на основе CaF₂, SrF₂, BaF₂. *Физика твердого тела*. 1966;8(1): 216–219.

19. Pastor R. C., Pastor A. C. Solid solutions of metal halides under a reactive atmosphere. *Materials Research Bulletin*. 1976;11(8): 1043–1050. [https://doi.org/10.1016/0025-5408\(76\)90183-5](https://doi.org/10.1016/0025-5408(76)90183-5)

20. Каримов Д. Н., Комарькова О. Н., Сорokin Н. И., Бежанов В. А., Чернов С. П., Попов П. А., Соболев Б. П. Выращивание конгруэнтно плавящихся кристаллов Ca_{0.59}Sr_{0.41}F₂ и исследование их некоторых свойств. *Кристаллография*. 2010;55(3): 556–563. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15108472>

21. Попов П. А., Моисеев Н. В., Каримов Д. Н., Sorokin N. I., Sulyanova E. A., Sobolev B. P., Konyush-

- kin V. A., Fedorov P. P. Thermophysical characteristics of $\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{F}_2$ solid-solution crystals ($0 \leq x \leq 1$). *Crystallography Reports*. 2015;60(1):116–122. <https://doi.org/10.1134/s1063774515010186>
22. Попов П. А., Круговых А. А., Конюшкин В. А., Накладов А. Н., Кузнецов С. В., Федоров П. П. Теплопроводность монокристаллов SrF_2 - BaF_2 . *Неорганические материалы*. 2021;57(6). <https://10.31857/S0002337X21060087>
23. Федоров П. П., Бучинская И. И., Ивановская Н. А., Коновалова В. В., Лаврищев С. В., Соболев Б. П. Фазовая диаграмма системы CaF_2 - BaF_2 . *Доклады академии наук*. 2005;401(5): 652–654. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9140160>
24. Wrubel G. P., Hubbard B. E., Agladge N. I., Sievers A. G., Fedorov P. P., Klimenchenko D. I., Ryskin A. I., Campbell G. A. Glasslike two-level systems in minimally disordered mixed crystals. *Physical Review Letters*. 2006;96(23): 235503. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.96.235503>
25. Chang R. K., Lacina B., Pershan P. S. Raman scattering from mixed crystals $\text{Ca}_x\text{Sr}_{1-x}\text{F}_2$ and $\text{Sr}_x\text{Ba}_{1-x}\text{F}_2$. *Physical Review Letters*. 1966;17(14): 755–778. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.17.755>
26. Басиев Т. Т., Васильев С. В., Дорошенко М. Е., Конюшкин В. А., Кузнецов С. В., Осико В. В., Федоров П. П. Эффективная генерация кристаллов твердых растворов CaF_2 - SrF_2 : Yb^{3+} при диодной лазерной накачке. *Квантовая электроника*. 2007;37(10): 934–937. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23451108>
27. Lyapin A. A., Ermakov A. S., Kuznetsov S. V., Gushchin S. V., Ryabochkina P. A., Konyushkin V. A., Nakladov A. N., Fedorov P. P. Upconversion luminescence of CaF_2 - SrF_2 - ErF_3 single crystals upon 1.5 μm laser excitation. *Journal of Physics: Conference Series (SPbOPEN 2019)*. 2019;1410: 012086 (4 pp). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1410/1/012086>
28. Кузнецов С. В., Конюшкин В. А., Накладов А. Н., Чернова Е. В., Попов П. А., Пынинков А. А., Нищев К. Н., Федоров П. П. Исследование теплофизических характеристик монокристаллов твердых растворов CaF_2 - SrF_2 - RF_3 ($R = \text{Ho}, \text{Pr}$) с флюоритовой структурой. *Неорганические материалы*. 2020;56(9): 1027–1033. <https://doi.org/10.31857/S0002337X20090110>
29. Ушаков С. Н., Усламина М. А., Нищев К. Н., Федоров П. П., Кузнецов С. В., Осико В. В. Исследование оптических центров ионов Yb^{3+} в кристаллах твердых растворов фторидов CaF_2 - SrF_2 - YbF_3 . *Оптика и спектроскопия*. 2020;128(5): 607–611. <https://doi.org/10.21883/OS.2020.05.49317.278-19>
30. Zhang W., Liaw P. K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*. 2018;61(1): 2–21. <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
31. Miracle D. B., Senkov O. N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. 2017;122: 448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
32. Федоров П. П. Критерии образования фторидных стекол. *Неорганические материалы*. 1997;33(12): 1415–1424.
33. Rost C. M., Sachet E., Borman T., Moballeghe A., Dickey E. C., Hou D., Jones J. L., Curtarolo S., Maria J.-P. Entropy-stabilized oxides. *Nature Communications*. 2016;6(1): 8485. <https://doi.org/10.1038/ncomms9485>
34. Chen X., Wu Y. High-entropy transparent fluoride laser ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*. 2019;103(2): 750–756. <https://doi.org/10.1111/jace.16842>
35. Kuznetsov S. V., Fedorov P. P. Morphological stability of solid-liquid interface during melt crystallization of solid solutions $\text{M}_{1-x}\text{R}_x\text{F}_{2+x}$. *Inorganic Materials*. 2008;44(13): 1434–1458. (Supplement). <https://doi.org/10.1134/S0020168508130037>
36. Федоров П. П., Бучинская И. И. Проблемы пространственной однородности кристаллических материалов и точки конгруэнтного плавления седловинного типа в тройных системах. *Успехи химии*. 2012;81: 1–20. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17284651>
37. Александров А. А., Маякова М. Н., Воронов В. В., Поминова Д. В., Кузнецов С. В., Баранчиков А. Е., Иванов В. К., Лысакова Е. И., Федоров П. П. Синтез ап-конверсионных люминофоров на основе фторида кальция. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2020;22(1): 3–10. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/2524>
38. Кузнецов С. В., Александров А. А., Федоров П. П. Фторидная оптическая нанокерамика. *Неорганические материалы*. 2021;57(6). <https://10.31857/S0002337X21060075>

Информация об авторах

Ушаков Сергей Николаевич, к. ф.-м. н., с. н. с. отдела нанотехнологий научного центра лазерных материалов и технологий института общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук Москва; с. н. с. лаборатории технологии оптических материалов института физики и химии Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева, Саранск, Республика Мордовия, Российская Федерация; e-mail: ushserg63@mail.ru. ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0002-6420-6791>.

Усламина Мария Анатольевна, к. х. н., с. н. с. лаборатории технологии оптических материалов института физики и химии Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева, Саранск, Республика Мордовия, Российская Федерация; e-mail: uslaminam@mail.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-0219-2643>.

Пыненков Александр Алексеевич, инженер НОЦ «Высокочистые материалы и элементы волоконной оптики и лазерной техники» института физики и химии Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева, Саранск, Республика Мордовия, Российская Федерация; e-mail: aleksyn@yandex.ru. ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0001-7546-7172>.

Мишкин Владимир Петрович, ведущий инженер лаборатории электронной микроскопии и малоугловой рентгеновской дифрактометрии института физики и химии Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева, Саранск, Республика Мордовия, Российская Федерация; e-mail: Vladimirm1978@mail.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7514-1906>.

Нищев Константин Николаевич, к. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой общей физики, институт физики и химии Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева, Саранск, Республика Мордовия, Российская Федерация; e-mail: nishchev@inbox.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7905-3700>.

Кузнецов Сергей Викторович, к. х. н., в. н. с. лаборатории технологии наноматериалов для фотоники отдела нанотехнологий научного центра лазерных материалов и технологий института общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация; e-mail: kouznetzovsv@gmail.com. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7669-1106>.

Чернова Елена Владимировна, м. н. с. института общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация; e-mail: e-chernova@yandex.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7401-5019>.

Фёдоров Павел Павлович, д. х. н., профессор, гл. н. с. Института общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация; e-mail: ppfedorov@yandex.ru. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2918-3926>.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 22.01.2021; одобрена после рецензирования 15.02.2021; принята к публикации 15.03.2021; опубликована онлайн 25.03.2021.