НЕОРГАНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, 2020, том 56, № 9, с. 1027–1033

УДК 546.161

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОНОКРИСТАЛЛОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ CaF_2–SrF_2–RF_3 (R = Ho, Pr) С ФЛЮОРИТОВОЙ СТРУКТУРОЙ

© 2020 г. С. В. Кузнецов[1], В. А. Конюшкин[1], А. Н. Накладов[1], Е. В. Чернова[1], П. А. Попов[2], А. А. Пыненков[3], К. Н. Нищев[3], П. П. Федоров[1, *]

[1]Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, ул. Вавилова, 38, Москва, 119991 Россия

[2]Брянский государственный университет им. И.Г. Петровского, ул. Бежицкая, 14, Брянск, 241036 Россия

[3]Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, ул. Большевисткая, 68, Саранск, 430005 Россия

*e-mail: ppfedorov@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.12.2019 г.
После доработки 10.03.2020 г.
Принята к публикации 25.03.2020 г.

Методом Бриджмена в вакууме с использованием фторирующей атмосферы выращены монокристаллы твердых растворов $Ca_{0.60}Sr_{0.40-x}R_xF_{2+x}$ (R = Ho, Pr) высокого оптического качества. Теплопроводность твердых растворов $Ca_{0.60}Sr_{0.40-x}Ho_xF_{2+x}$ при комнатной температуре уменьшается от 3.27 до 2.37 Вт/(м K) при увеличении концентрации гольмия от 0 до 3 мол. % соответственно. Теплопроводность твердых растворов $Ca_{0.50}Sr_{0.50-x}Pr_xF_{2+x}$ при комнатной температуре уменьшается от 3.38 до 2.18 Вт/(м K) при увеличении концентрации празеодима от 0 до 8 мол. % соответственно. При увеличении содержания гольмия и празеодима в трехкомпонентных твердых растворах происходит постепенное повышение показателя преломления, а при увеличении длины волны – постепенное уменьшение показателя преломления.

Ключевые слова: монокристаллы, фториды, твердые растворы, флюоритовая структура

DOI: 10.31857/S0002337X20090110

ВВЕДЕНИЕ

Монокристаллы твердых растворов со структурой флюорита MF_2 (M = Ca, Sr, Ba), легированные редкоземельными элементами (РЗЭ), являются хорошо известными лазерными средами [1]. В настоящее время особое внимание уделяется монокристаллам CaF_2:Yb [2–13], на которых величины КПД генерации достигают 35%. Монокристаллы данного твердого раствора выбраны в качестве активной лазерной среды для разработки лазера петаваттной мощности (проект PENELOPA) [14]. К настоящему времени разработаны более эффективные лазерные среды с КПД лазерной генерации более 80% на основе трехкомпонентных разупорядоченных твердых растворов с флюоритовой структурой CaF_2–SrF_2–YbF_3 [15–17]. Методом горячего формования монокристаллов была получена лазерная нанокерамика CaF_2–SrF_2–YbF_3, КПД генерации которой был несколько хуже, чем у монокристаллов, но при этом керамика обладала лучшими механическими характеристиками [18].

В настоящее время интерес представляют материалы, обладающие лазерной генерацией в видимом и 2 мкм-диапазонах спектра, основанной на переходах празеодима [19, 20] и гольмия [21–24] соответственно.

Для оценки возможностей применения кристаллических сред в лазерной технике необходимо знание основных теплофизических характеристик.

Целью данной работы являлось определение коэффициентов теплопроводности в широком температурном диапазоне и показателей преломления для трех длин волн (633.5, 969.0 и 1539.5 нм) при вариации концентрации празеодима и гольмия в твердых растворах фторидов кальция и стронция.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Выращивание монокристаллов проводилось методом вертикальной направленной кристаллизации (метод Бриджмена) в вакуумированной камере в графитовых тиглях с графитовыми тепловыми экранами, в установке с резистивным на-

Таблица 1. Показатели преломления твердых растворов CaF_2–SrF_2–RF_3 (R = Ho, Pr)

Состав, мол. доли			Показатель преломления		
CaF_2	**SrF_2**	**HoF_3**	**633.5 нм**	**969.0 нм**	**1539.5 нм**
0.600	0.399	0.001	1.4361	1.4325	1.4293
0.600	0.395	0.005	1.4363	1.4330	1.4303
0.600	0.390	0.010	1.4380	1.4346	1.4310
0.600	0.385	0.015	1.4389	1.4348	1.4319
0.600	0.370	0.030	1.4407	1.4372	1.4345
CaF_2	**SrF_2**	**PrF_3**	**633.5 нм**	**969.0 нм**	**1539.5 нм**
0.500	0.495	0.005	1.4361	1.4339	1.4307
0.500	0.490	0.010	1.4379	1.4348	1.4319
0.500	0.485	0.015	1.4384	1.4362	1.4328
0.500	0.480	0.020	1.4403	1.4374	1.4344
0.500	0.460	0.040	1.4448	1.4406	1.4386
0.500	0.420	0.080	1.4543	1.4514	1.4480

гревом при использовании графитового нагревателя сопротивления. Оценку условий выращивания проводили по данным работы [25]. Для роста использовали: фторид кальция – бой оптических монокристаллов (производства Государственного оптического института им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург), SrF_2 (99.99 – НЕВАТОРГ), HoF_3, PrF_3 (99.99 производства ООО ЛАНХИТ). Реактивы, за исключением фторида кальция, предварительно переплавляли с фторированием в плоскодонных графитовых тиглях с крышкой (давление CF_4 0.1 атм.). Рассчитанные количества реагентов взвешивали, перетирали, затем тщательно перешихтовывали в агатовой ступке для получения однородного порошка. Нагрев проводился последовательным добавлением мощности нагревателя. При достижении температуры процесса проводили фторирование расплава газообразным CF_4 и выдержку в течение 1 ч для его очистки от кислородсодержащих примесей шихты, гомогенизации и для предотвращения высокотемпературного пирогидролиза. Скорость опускания тигля составляла 7 мм/ч. После окончания перемещения тигля из горячей зоны в холодную проводили последовательное охлаждение со скоростью 330 К/ч. Выращены 2 серии монокристаллов: $Ca_{0.60}Sr_{0.40-x}Ho_xF_{2+x}$ с $x \le 0.03$ и $Ca_{0.50}Sr_{0.50-x}Pr_xF_{2+x}$ с $x \le 0.08$.

Показатель преломления определяли методом полного внутреннего отражения на рефрактометре METRICON для трех длин волн (633.5, 969.0 и 1539.5 нм). Точность определения показателя преломления – 0.0005. Разрешение по определению показателя преломления – 0.0003.

Теплопроводность в интервале температур 50–300 К определяли абсолютным стационарным методом продольного теплового потока. Аппаратура и методика измерений описаны в [26, 27]. Погрешность измерений не превосходила ±5%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений показателя преломления на трех различных длинах волн (633.5, 969.0 и 1539.5 нм) для твердых растворов CaF_2–SrF_2–RF_3 (R = Ho, Pr) представлены в табл. 1 и на рис. 1, 2. Увеличение содержания редкоземельного фторида в твердом растворе приводит к закономерному увеличению показателя преломления вследствие высоких величин ионных рефракций фторидов РЗЭ [28]. Измеренные концентрационные зависимости показателей преломления хорошо аппроксимируются линейными зависимостями (рис. 1, 2). Значения показателей преломления для нелегированного твердого раствора $Ca_{0.60}Sr_{0.40}F_2$ соответствуют данным [29].

Результаты измерения теплопроводности монокристаллических образцов твердого раствора $Ca_{0.60}Sr_{0.40-x}Ho_xF_{2+x}$ представлены графически на рис. 3 и в табл. 2. Для сравнения измеренных величин с ранее опубликованными в [30] на рис. 3 и 4

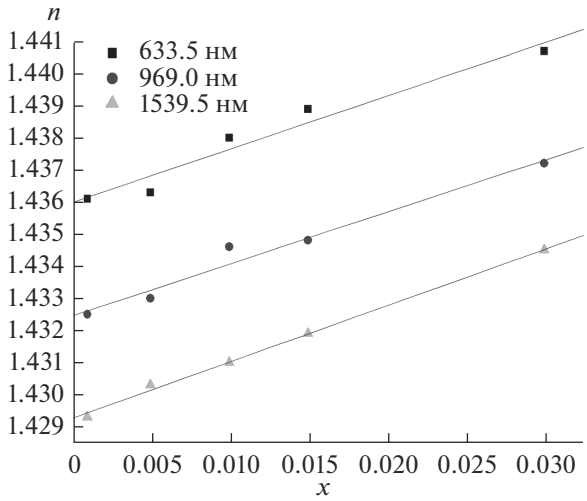

Рис. 1. Показатели преломления твердого раствора $Ca_{0.60}Sr_{0.40-x}Ho_xF_{2+x}$.

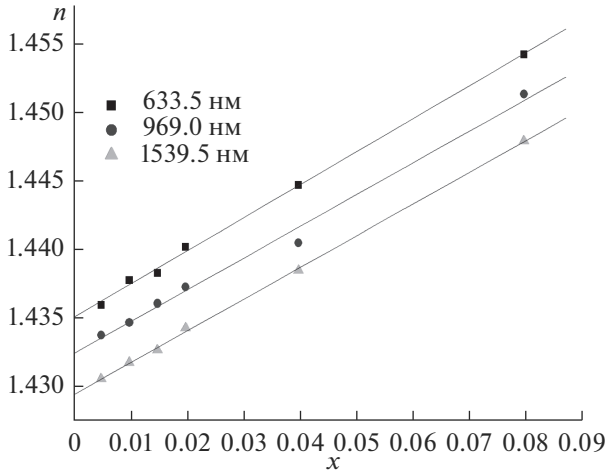

Рис. 2. Показатели преломления твердого раствора $Ca_{0.50}Sr_{0.50-x}Pr_xF_{2+x}$.

были добавлены данные для твердого раствора $Ca_{0.60}Sr_{0.40}F_2$ ($x = 0$).

Концентрационная зависимость теплопроводности твердого раствора $Ca_{0.60}Sr_{0.40-x}Ho_xF_{2+x}$ для разных температур представлена на рис. 4. Экспериментальные точки $\kappa(x)$ лежат практически на аппроксимирующих кривых. В области комнатной температуры (T = 300 K) величина теплопроводности для исследованного диапазона концентраций $0 \le x \le 0.03$ изменяется от 3.27 до 2.37 Вт/(м K).

Анализ данных по теплопроводности твердого раствора $Ca_{0.60}Sr_{0.40-x}Ho_xF_{2+x}$ выявил, что при увеличении содержания гольмия происходит уменьшение теплопроводности, что ранее наблюдалось в работе [26], из-за увеличения степени разупорядочения твердых растворов и уменьшения длины пробега фононов.

Результаты измерения теплопроводности монокристаллических образцов твердого раствора $Ca_{0.50}Sr_{0.50-x}Pr_xF_{2+x}$ представлены на рис. 5, 6 и в табл. 3.

Из рис. 5 и 6 видно, что величина теплопроводности монотонно убывает с ростом содержания празеодима и соответствующим уменьшением содержания стронция. Это очевидным образом объясняется существенно различным влиянием на теплопроводность гетеровалентного ионного замещения по сравнению с изовалентным. Образующиеся при внесении в такие кристаллы трехвалентных РЗЭ крупные кластеры дефектов являются эффективными центрами фононного рассеяния, ответственными за значительное снижение теплопроводности.

Выявленные концентрационные зависимости теплопроводности $\kappa(x)$ твердых растворов для различных температур не содержат каких-либо аномалий. Это позволяет с уверенностью использовать метод интерполяции для оценки теплопроводности промежуточных составов.

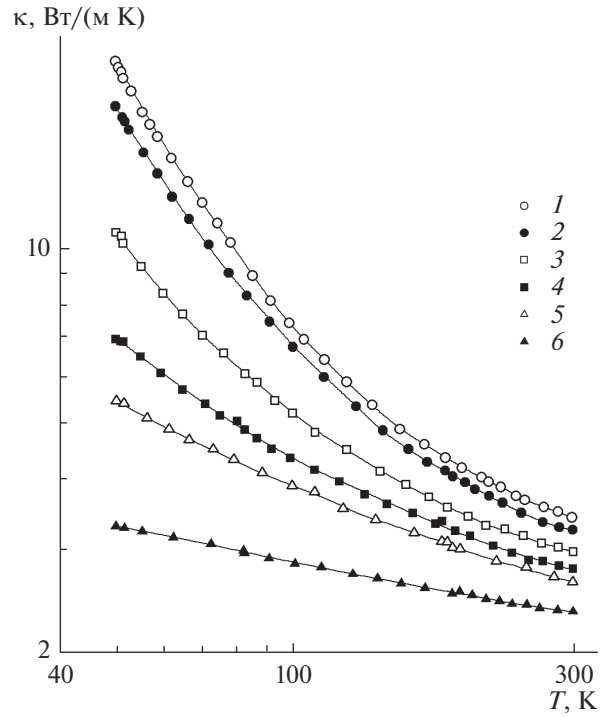

Рис. 3. Температурные зависимости теплопроводности монокристаллических образцов твердого раствора $Ca_{0.60}Sr_{0.40-x}Ho_xF_{2+x}$: $x = 0$ (*1*), 0.001 (*2*), 0.005 (*3*), 0.01 (*4*), 0.015 (*5*), 0.03 (*6*).

Таблица 2. Теплопроводность монокристаллов твердого раствора $Ca_{0.60}Sr_{0.40-x}Ho_xF_{2+x}$

T, K	κ, Вт/(м K)				
	$x = 0.001$	$x = 0.005$	$x = 0.01$	$x = 0.015$	$x = 0.03$
50	17.5	10.6	7.01	5.47	3.32
60	13.1	8.4	6.11	4.95	3.21
70	10.4	7.1	5.44	4.59	3.11
80	8.8	6.3	4.97	4.31	3.02
90	7.7	5.7	4.62	4.08	2.95
100	6.8	5.2	4.35	3.91	2.88
110	6.2	4.84	4.14	3.76	2.83
120	5.7	4.58	3.98	3.62	2.78
130	5.3	4.36	3.84	3.49	2.73
140	4.9	4.16	3.71	3.40	2.70
150	4.66	4.00	3.60	3.32	2.66
160	4.46	3.86	3.50	3.25	2.63
170	4.29	3.74	3.40	3.18	2.60
180	4.15	3.62	3.32	3.12	2.57
190	4.03	3.53	3.25	3.05	2.55
200	3.91	3.45	3.18	3.00	2.52
210	3.80	3.37	3.12	2.95	2.50
220	3.71	3.31	3.07	2.91	2.48
230	3.62	3.26	3.02	2.87	2.46
240	3.54	3.21	2.98	2.84	2.44
250	3.47	3.17	2.95	2.80	2.43
260	3.41	3.13	2.91	2.77	2.41
270	3.36	3.09	2.88	2.74	2.40
280	3.32	3.06	2.85	2.71	2.39
290	3.29	3.03	2.82	2.69	2.38
300	3.27	3.0	2.80	2.66	2.37

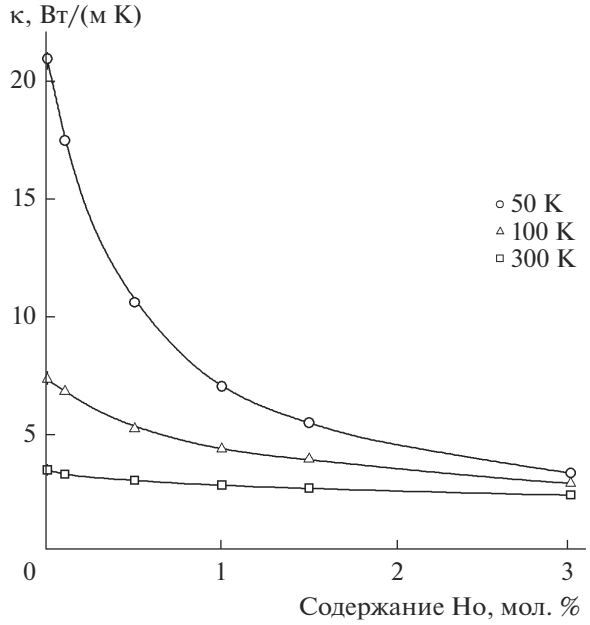

Рис. 4. Концентрационные зависимости теплопроводности твердого раствора $Ca_{0.60}Sr_{0.40-x}Ho_xF_{2+x}$ для разных температур.

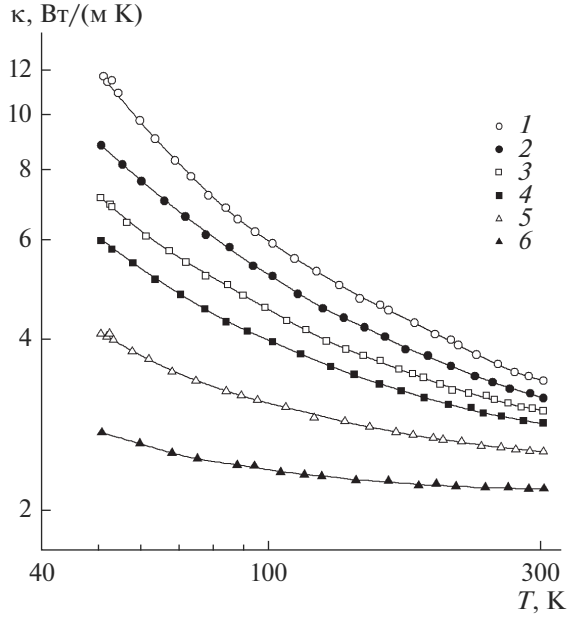

Рис. 5. Температурные зависимости теплопроводности монокристаллических образцов твердого раствора $Ca_{0.50}Sr_{0.50-x}Pr_xF_{2+x}$: $x = 0.005$ (*1*), 0.01 (*2*), 0.015 (*3*), 0.02 (*4*), 0.04 (*5*), 0.08 (*6*).

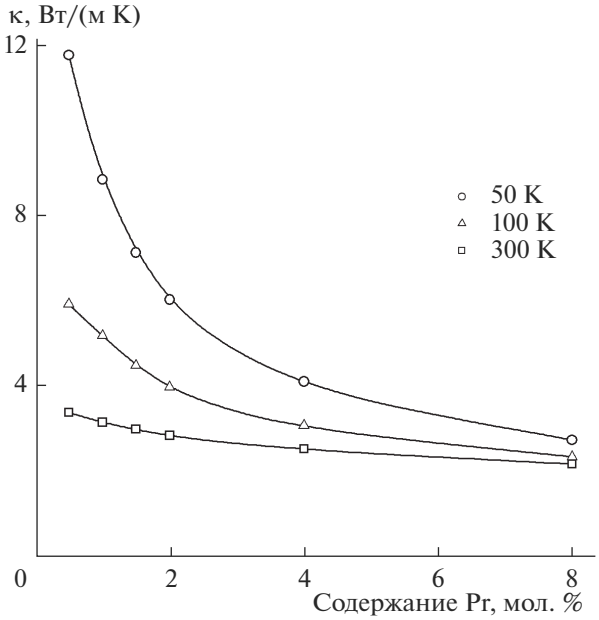

Рис. 6. Концентрационные зависимости теплопроводности твердого раствора $Ca_{0.50}Sr_{0.50-x}Pr_xF_{2+x}$ для разных температур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выращены монокристаллы твердых растворов CaF_2–SrF_2–RF_3 (R = Ho, Pr) высокого оптического качества. Измерены показатели преломления и теплопроводность в широком температурном диапазоне, выявлено монотонное изменение теплофизических характеристик в зависимости от содержания РЗЭ. Теплопроводность твердого раствора $Ca_{0.60}Sr_{0.40-x}Ho_xF_{2+x}$ при комнатной температуре уменьшается от 3.27 до 2.37 Вт/(м K) при увеличении концентрации гольмия от 0 до 3 мол. % соответственно. Теплопроводность твердого раствора $Ca_{0.50}Sr_{0.50-x}Pr_xF_{2+x}$ при комнатной температуре уменьшается от 3.38 до 2.18 Вт/(м K) при увеличении концентрации празеодима от 0 до 8 мол. % соответственно.

При увеличении содержания гольмия и празеодима в трехкомпонентных твердых растворах происходит увеличение показателя преломления, а при увеличении длины волны постепенное уменьшение показателя преломления. Изменения пока-

Таблица 3. Теплопроводность монокристаллов твердого раствора $Ca_{0.50}Sr_{0.50-x}Pr_xF_{2+x}$

T, K	κ, Вт/(м K)					
	$x = 0.005$	$x = 0.01$	$x = 0.015$	$x = 0.02$	$x = 0.04$	$x = 0.08$
50	11.7	8.8	7.1	6.0	4.1	2.74
60	9.4	7.5	6.1	5.25	3.7	2.60
70	8.0	6.6	5.5	4.76	3.44	2.49
80	7.0	6.0	5.1	4.39	3.28	2.43
90	6.35	5.5	4.75	4.14	3.16	2.39
100	5.90	5.16	4.48	3.96	3.07	2.35
110	5.54	4.85	4.24	3.80	3.00	2.32
120	5.26	4.59	4.05	3.66	2.94	2.30
130	5.02	4.41	3.90	3.55	2.88	2.28
140	4.81	4.27	3.79	3.45	2.83	2.26
150	4.64	4.14	3.69	3.37	2.79	2.25
160	4.50	4.00	3.60	3.30	2.76	2.24
170	4.37	3.88	3.52	3.24	2.73	2.23
180	4.25	3.79	3.45	3.18	2.70	2.22
190	4.13	3.71	3.38	3.13	2.68	2.21
200	4.03	3.63	3.32	3.09	2.66	2.21
210	3.93	3.56	3.27	3.05	2.64	2.20
220	3.83	3.49	3.22	3.01	2.62	2.20
230	3.75	3.43	3.18	2.98	2.61	2.19
240	3.67	3.38	3.14	2.95	2.59	2.19
250	3.60	3.33	3.11	2.93	2.58	2.19
260	3.54	3.29	3.08	2.91	2.57	2.19
270	3.49	3.25	3.05	2.89	2.56	2.18
280	3.44	3.21	3.03	2.87	2.55	2.18
290	3.41	3.18	3.01	2.85	2.54	2.18
300	3.38	3.15	2.99	2.84	2.53	2.18

зателя преломления описываются линейными зависимостями.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке программы президиума РАН № 5 “Фотонные технологии в зондировании неоднородных сред и биообъектов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kaminskii A.A.* Laser Crystals. Their Physics and Properties. Berlin: Springer, 1990.
2. *Hughes-Currie R.B., Salked A.J. et al.* Excitons and Interconfigurational Transitions in CaF_2:Yb^{2+} Crystals // J. Lumin. 2015. V. 158. P. 197–202.
3. *Mahlik S., Lazarowska A., Grinberg M., Wells J.-P.R., Reid M.F.* Pressure Dependence of the Emission in CaF_2:Yb^{2+} // J. Phys. Condens. Matter. 2015. V. 27. P. 305501.
4. *Lucca A., Debourg G., Jacquement M., Druon F., Balembois F., Georges P.* High-Power Diode-Pumped Yb^{3+}:CaF_2 Femtosecond Laser // Opt. Lett. 2004. V. 29. P. 2767–2769.
5. *Siebold M., Bock S., Schramm U. et al.* Yb:CaF_2 – a New Old Laser Crystal // Appl. Phys. B. 2009. V. 97. P. 327–338.
6. *Aballea P., Suganuma A., Druon F. et al.* Laser Performance of Diode-pumped Yb:CaF_2 Optical Ceramics Synthesized Using an Energy-Efficient Process // Optica. 2015. V. 2. P. 288–291.
7. *Kessler A., Hornung M., Keppler S. et al.* 16.6 J Chirped Femtosecond Laser Pulses from a Diode-Pumped Yb:CaF_2 Amplifier // Opt. Lett. 2014. V. 39. P. 1333–1336.
8. *Machinet G., Andriukaitis G., Sevillano P. et al.* High-Gain Amplification in Yb:CaF_2 Crystals Pumped by a High-Brightness Yb-Doped 976 nm Fiber Laser // Appl. Phys. B. 2013. V. 111. P. 495–500.
9. *Ito M., Goutaudier C., Guyot Y. et al.* Crystal Growth. Yb^{3+} Spectroscopy. Concentration Quenching Analysis and Potentiality of Laser Emission in $Ca_{1-x}Yb_xF_{2+x}$ // J. Phys.: Condens. Matter. 2004. V. 16. P. 1501–1521.
10. *Apollonov V.V.* High Power Disk Laser: Advantages and Prospects // Am. J. Modern Phys. 2012. V. 1. P. 1–6.
11. *Ricaud S., Papadopoulos D.N., Pellegrina A. et al.* High-power Diode-pumped Cryogenically Cooled Yb:CaF_2 Laser with Extremely Low Quantum Defects // Opt. Lett. 2011. V. 36. P. 1602–1604.
12. *Fedorov P.P., Kuznetsov S.V., Osiko V.V.* Elaboration of Nanofluorides and Ceramics for Optical and Laser Applications // Chapter in the book “Photonic & Electronic Properties of Fluoride Materials” / Ed. Tressaud A., Poeppelmeier. K. Print Book. Elsevier, 2016. P. 7–31.
13. *Fedorov P.P., Osiko V.V.* Crystal Growth of Fluorides // Bulk Crystal Growth of Electronic. Optical and Optoelectronic Materials / Ed. Capper P. Wiley Series in Materials for Electronic and Optoelectronic Applications. N.Y.: Wiley, 2005. P. 339–356.
14. *Albach D., Loeser M., Siebold M., Schramm U.* Performance Demonstration of the PENELOPE Main Amplifier HEPA I Using Broadband Nanosecond Pulses // High Power Las. Sci. Eng. 2019. V. 7. e1. 9 p.
15. *Fedorov P.P.* Compositions of Congruently Melting Three-component Solid Solutions Determined by Finding Acnodes on Ternary System Fusion Surfaces // Growth of Crystals / Ed. Givargizov E.I., Melnicova A.M. N.Y.: Consultants Bureau, 1996. V. 20. P. 103–116.
16. *Федоров П.П., Бучинская И.И.* Проблемы пространственной однородности кристаллических материалов и точки конгруэнтного плавления седловинного типа в тройных системах // Успехи химии. 2012. Т. 81. С. 1–20.
17. *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. Т. 37. № 10. С. 934–937.
18. *Basiev T.T., Doroshenko M.E., Fedorov P.P., Konyushkin V.A., Kuznetsov S.V., Osiko V.V., Akchurin M.Sh.* Efficient Laser Based on CaF_2–SrF_2–YbF_3 Nanoceramics // Opt. Lett. 2008. V. 33 .№5 P. 521–523. https://doi.org/10.1364/OL.33.000521
19. *Basiev T.T., Konyushkin V.A., Konyushkin D.V., Doroshenko M.E., Huber G., Reichert F., Hansen N.-O., Fechner M.* First Ceramic Laser in the Visible Spectral Range // Opt. Mater. Express. 2011. V. 1. P. 1511–1514.
20. *Morozov O., Kuznetsov S., Konyushkin V., Nakladov A., Nizamitdinov A., Fedorov P., Semashko V.* Prospective Visible Laser Active Media Based on Disordered Fluorite-Type Structure Crystals // Eur. Phys. J. Conferences (IWQO-2019). 2019. V. 220. P. 03024. https://doi.org/10.1051/epjconf/201922003024
21. *Šulc J., Němec M., Jelínková H., Doroshenko M., Fedorov P.P., Osiko V.V.* Diode Pumped Tunable Lasers Based on Tm:CaF_2 and Tm:Ho:CaF_2 Ceramics // Proc. of SPIE. 2014. V. 8959. P. 895925-1. https://doi.org/10.1117/12.2040763
22. *Nemec M., Šulc J., Jelinek M., Kubecek V., Jelinkova H., Doroshenko M.E., Alimov O.K., Konyushkin V.A., Nakladov A.N., Osiko V.V.* Thulium Fiber Pumped Tunable Ho:CaF_2 Laser // Opt. Lett. 2017. V. 42. P. 1852–1855. https://doi.org/10.1364/OL.42.001852
23. *Lyapin A.A., Ryabochkina P.A., Chabushkin A.N., Ushakov S.N., Fedorov P.P.* Investigation of the Mechanisms of Upconversion Luminescence in Ho^{3+} Doped CaF_2 Crystals and Ceramics upon Excitation of $^5I_7$ Level // J. Lumin. 2015. V. 167. P. 120–125.
24. *Fedorov P.P., Luginina A.A., Kuznetsov S.V., Voronov V.V., Lyapin A.A., Ermakov A.S., Pominova D.V., Yapryntsev A.D., Ivanov V.K., Pynenkov A.A., Nishchev K.N.* Composite Up-Conversion Luminescent Films Containing a Nanocellulose and SrF_2:Ho Particles // Cellulose. 2019. V. 26. P. 2403–2423. https://doi.org/10.1007/s10570-018-2194-4
25. *Федоров П.П., Ушаков С.Н., Усламина М.А., Чернова Е.В., Кузнецов С.В., Воронов В.В., Duvel A., Heitjans P., Пыненков А.А., Нищев К.Н., Осико В.В.*

Устойчивость фронта кристаллизации твердого раствора $Ca_{1-x}Sr_xF_2$ по отношению к концентрационному переохлаждению // Кристаллография. 2018. Т. 63. № 5. С. 820–826. https://doi.org/10.1134/S0023476118050107

26. *Попов П.А., Федоров П.П.* Теплопроводность фторидных оптических материалов. Брянск: Группа компаний “Десяточка”, 2012. 210 с.

27. *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_2 Single Crystals // Ionics. 2017. V. 23. № 1. P. 233–239. https://doi.org/10.1007/s11581-016-1802-2

28. *Константинова А.Ф., Кривандина Е.А., Каримов Д.Н., Соболев Б.П.* Расчет показателей преломления кристаллов $M_{1-x}R_xF_{2+x}$ (M = Ca, Sr, Ba, Cd, Pb; R – редкоземельные элементы) // Кристаллография. 2010. Т. 55. № 6. С. 1050–1054.

29. *Каримов Д.Н., Комарькова О.Н., Сорокин Н.И., Бежанов В.А., Чернов С.П., Попов П.А., Соболев Б.П.* Выращивание конгруэнтно-плавящихся кристаллов $Ca_{0.59}Sr_{0.41}F_2$ и исследование их некоторых свойств // Кристаллография. 2010. Т. 55. № 3. С. 556–563.

30. *Попов П.А., Моисеев Н.В., Каримов Д.Н., Сорокин Н.И., Сульянова Е.А., Соболев Б.П., Конюшкин В.А., Федоров П.П.* Теплофизические характеристики кристаллов твердого раствора $Ca_{1-x}Sr_xF_2$ // Кристаллография. 2015. Т. 60. С. 133–139.