

УДК 533.72

DOI: 10.18384/2310-7251-2018-4-122-126

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЙ КЛАСС СОЕДИНЕНИЙ С ПЕРЕСТРАИВАЕМОМ ЭФФЕКТИВНЫМ АТОМНЫМ НОМЕРОМ Z ДЛЯ ДЕТЕКТОРОВ ГАММА-НЕЙТРОННОГО ДИАПАЗОНА

**Саркисов С.Э.¹, Рябченков В.В.¹, Юсим В.А.¹, Сметанин М.Ю.²,
Шайхатаров О.К.³, Самонов А.С.³**

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»
123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Российская Федерация

² ООО «Техноим»
125481, г. Москва, ул. Свободы, д. 81, стр. 4, офис 695, Российская Федерация

³ Автономная некоммерческая организация «Центр Прикладных Компьютерных Технологий»

125481, г. Москва, ул. Свободы, д. 81, стр. 4, офис 695/2, Российская Федерация

Аннотация. Предложен способ направленного поиска кристаллических сцинтилляторов с заранее заданными свойствами по чувствительности к нейтронному и γ -излучению путём изменения параметра Z в зависимости от состава кристаллической матрицы. В качестве матриц выбраны разупорядоченные фторсодержащие кристаллические среды. Рассчитаны значения изменения параметра Z для кристаллических твёрдых растворов смешанных кристаллов $\text{Li}(\text{Y}_{1-x}\text{Lu}_x)\text{F}_4$ и $\text{Ba}(\text{Y}_{1-x}\text{Yb}_x)_2\text{F}_8$ в диапазоне коэффициента « x » от 0 до 1.

Ключевые слова: сцинтиллятор, фториды, смешанные и простые кристаллы, кристаллические твёрдые растворы, лёгкие и тяжёлые сцинтилляторы.

CRYSTALLINE COMPOUNDS WITH TUNABLE EFFECTIVE ATOMIC NUMBER Z FOR GAMMA AND NEUTRON DETECTORS

**S. Sarkisov¹, V. Ryabchenkov¹, V. Yusim¹, M. Smetanin², O. Shaihatarov³,
A. Samonov³**

¹ National Research Center “Kurchatov Institute”
pl. Akad. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russian Federation

² Ltd “Tekhnoim”
ul. Svobody 81, stroenie 4, office 695, 125481 Moscow, Russian Federation

³ Autonomous non-profit organization “Center for Applied Computer Technologies”
ul. Svobody 81, stroenie 4, office 695/2, 125481 Moscow, Russian Federation

Abstract. A method for directional search of crystalline scintillators with predetermined properties on sensitivity to γ and neutron emissions is proposed on the basis of Z -parameter variation as a function of the crystal host composition. Disordered fluoride crystal media are

used as the host materials. Changes in the Z parameter for crystalline solid solutions of the mixed $\text{Li}(\text{Y}_{1-x}\text{Lu}_x)\text{F}_4$ and $\text{Ba}(\text{Y}_{1-x}\text{Yb}_x)_2\text{F}_8$ crystals within x -coefficients from 0 to 1 are calculated.

Key words: scintillator, fluorides, mixed and simple crystals, crystalline solid solutions, light and heavy scintillators.

Одними из основных ориентиров при выборе сцинтиллятора (СЦ) для детектирования того или иного ионизирующего излучения являются такие параметры, как эффективный атомный номер (Z) и плотность (ρ) матрицы. От их величины зависит способность кристаллической матрицы задерживать рентгеновские или γ – лучи, т.е. чувствительность сцинтиллятора к детектированию последних. В первом приближении эта способность является функцией $\sim \rho Z^4$ (где $Z = (\sum w_i z_i^4)^{1/4}$, здесь w_i и z_i – означают массовую долю и атомный номер i -го элемента среди элементов, составляющих матрицу). Фториды тяжелых металлов (Y, La, Ce, Gd, Yb, Lu, Pb, Zr, Hf), имеющих большие величины плотностей (например, $\rho(\text{YF}_3) = 5,06 \text{ г/см}^3$, $\rho(\text{LuF}_3) = 8,3 \text{ г/см}^3$) и эффективных атомных номеров проявляют чувствительность к рентгеновскому и гамма-излучению, а монокристаллы, состоящие из фторидов легких металлов (например, $\rho(\text{LiF}) = 2,64 \text{ г/см}^3$) чувствительны к нейтронному излучению.

Настоящее исследование посвящено перспективному способу направленного поиска сцинтилляторов с заранее заданными свойствами, необходимыми для детектирования тех или иных типов излучения, путем выращивания монокристаллов из твердых растворов, которые образуют смешанные фторидные системы [1, 2]. В отличие от простых кристаллов со строго стехиометрическим составом, составы кристаллических твердых растворов можно монотонно менять в сторону больших или меньших значений плотностей и эффективных атомных номеров компонентов, образующих состав твердого раствора, в зависимости от того, какой тип сцинтиллятора, и с какими параметрами требуется получить¹.

В качестве примера рассмотрим простые кристаллы со стехиометрическими составами LiYF_4 ($Z = 40$), LiLuF_4 ($Z = 44$) и образующие ими непрерывный ряд твердых растворов в системе $\text{LiF} - \text{YF}_3 - \text{LuF}_3$ с общей стехиометрической формулой составов $\text{Li}(\text{Y}_{1-x}\text{Lu}_x)\text{F}_4$, имеющих максимальное значение Z равное 92 при $x = 0,55-0,65$ (см. Рис.1). Здесь, «легкий» сцинтиллятор LiYF_4 ($Z = 40$) известен в качестве детектора нейтронного излучения, а смешанный кристалл $\text{Li}(\text{YLu})\text{F}_4$, имеющий $Z = 92$ можно характеризовать как «тяжелый» сцинтиллятор для регистрации рентгеновского и гамма-излучения. Небольшая добавка в 5% LiLuF_4 к LiYF_4 увеличивает его Z с 40 до 75, сравнимо с PbWO_4 ($Z = 73$), используемого в настоящее время в Большом Адронном Коллайдере (LHC) в CERN. Таким образом, в ряду твердых растворов $\text{Li}(\text{Y}_{1-x}\text{Lu}_x)\text{F}_4$ при $0 < x < 1$, где Z меняется, проходя через максимум от $40 \rightarrow 92 \rightarrow 44$ можно, задавая параметр Z направленно синтезировать нужный состав в зависимости от решаемой задачи детектирования нужного типа излучения. И наоборот, синтезировать кристаллический сцин-

¹ Саркисов С.Э., Рябченков В.В. Сцинтилляционный материал для регистрации ионизирующего излучения. (Варианты): Патент РФ №2627573 от 08.08.2017 г.

тиллятор конкретного кристаллохимического состава с заданным параметром Z . Кроме того, твердые растворы $\text{Li}(\text{Y}_{1-x}\text{Lu}_x)\text{F}_4$ имеют большую изоморфную емкость по отношению к ионам цериевой подгруппы, чем простые кристаллы LiYF_4 и LiLuF_4 . Это позволяет создавать яркие сцинтилляторы с высокими значениями интенсивности излучения $I_{\text{изл}}$, за счет возможности введения больших концентраций ионов Ce^{3+} (или Pr^{3+}) в кристаллическую решетку твердых растворов. По характеристикам ρ , Z и $I_{\text{изл}}$ кристаллы твердых растворов различных смешанных составов, в том числе с небольшими добавками других лантаноидов с примесью Ce^{3+} или Pr^{3+} (интегральный световыход может достигать до 27000 фотонов/МэВ) значительно превосходят известные сцинтилляторы PbWO_4 (200 фотонов/МэВ), а по быстродействию $\tau_{\text{изл}} = 10\text{-}15$ нс практически не уступают последним. При этом в случае активирования ионами Pr^{3+} они излучают в красной спектральной области $\sim 0,6$ мкм (переход ${}^3\text{P}_0 \rightarrow {}^3\text{H}_6$ иона Pr^{3+}), где существуют многочисленные чувствительные приемники излучения (ФЭУ). На Рис. 1 приведены рассчитанные значения Z для еще более «тяжелых» сцинтилляторов $\text{Ba}(\text{Y}_{1-x}\text{Yb}_x)_2\text{F}_8$, которые можно синтезировать в ряду твердых растворов системы $\text{BaF}_2 - \text{YF}_3 - \text{YbF}_3$ максимальное значение Z у соединений этого ряда достигает 125, что приблизительно до 2-ух раз выше, чем у PbWO_4 .

Из вышеизложенного материала следует, что путем синтеза кристаллических твердых растворов определенных составов внутри одного кристаллохимического класса можно создавать сцинтилляторы, чувствительные к определенному типу ионизирующего излучения в широком диапазоне от нейтронного до γ .

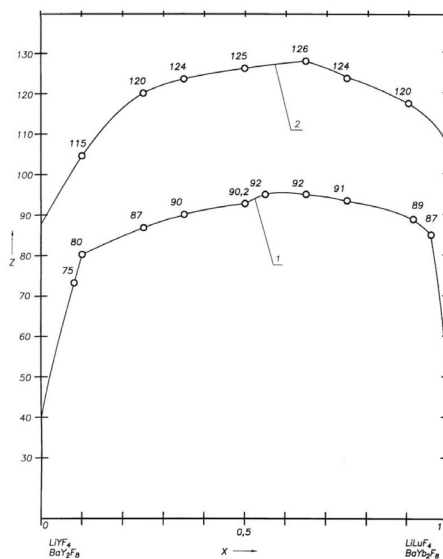


Рис. 1. Рассчитанные значения изменения параметра Z от состава кристаллических твердых растворов смешанных кристаллов $\text{Li}(\text{Y}_{1-x}\text{Lu}_x)\text{F}_4$ (кривая 1) и $\text{Ba}(\text{Y}_{1-x}\text{Yb}_x)_2\text{F}_8$ (кривая 2).

Статья поступила в редакцию 01.10.2018 г.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 18-08-00291, 17-08-00963, 17-08-00680, 18-08-00495, 18-08-00697).

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant Nos 18-08-00291, 17-08-00963, 17-08-00680, 18-08-00495, and 18-08-00697).

ЛИТЕРАТУРА

1. Kaminskii A.A., Sarkisov S.E. Thermodynamical Consideration of the Peculiarities of Activator Ion Quascentres in Disordered Laser Crystals // *Physica Status Solidi (a)*. 1991. Vol. 123. Iss. 1. P. 213–219.
2. Каминский А.А., Саркисов С.Э. Физика и спектроскопия лазерных кристаллов. М.: Наука, 1986. 272 с.

REFERENCES

1. Kaminskii A.A., Sarkisov S.E. Thermodynamical Consideration of the Peculiarities of Activator Ion Quascentres in Disordered Laser Crystals. In: *Physica Status Solidi (a)*, 1991, vol. 123, iss. 1, pp. 213–219.
2. Kaminskii A.A., Sarkisov S.E. *Fizika i spektroskopiya lazernykh kristallov* [Physics and spectroscopy of laser crystals]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 272 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Саркисов Степан Эвандович – кандидат физико-математических наук, начальник Лаборатории экспериментального моделирования и синтеза тугоплавких материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»;
e-mail: dr.stevesarkisov@gmail.com;

Рябченков Владимир Васильевич – кандидат физико-математических наук, заместитель руководителя Управления нераспространения и физической защиты Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»;
e-mail: RVV55@yandex.ru;

Юсим Валентин Александрович – старший научный сотрудник Лаборатории экспериментального моделирования и синтеза тугоплавких материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»;
e-mail: Yusim_VA@nrcki.ru;

Сметанин Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, начальник лаборатории переноса излучений ООО «Техноим»;
e-mail: sm@lokip.ru;

Шайхатаров Олег Карипович – начальник группы программных систем ООО «Техноим»; начальник лаборатории Автономной некоммерческой организации «Центр Прикладных Компьютерных Технологий»;
e-mail: ok@lokip.ru;

Самонов Алексей Сергеевич – ведущий специалист ООО «Техноим»; ведущий специалист Автономной некоммерческой организации «Центр Прикладных Компьютерных Технологий»;
e-mail: sa@lokip.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Stepan E. Sarkisov – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory of Experimental Modeling and Synthesis of Refractory Materials, National Research Center “Kurchatov Institute”;
e-mail: dr.stevesarkisov@gmail.com4

Vladimir V. Ryabchenkov – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Deputy Head of the Department on Nonproliferation and Physical Protection, National Research Center “Kurchatov Institute”;
e-mail: RVV55@yandex.ru;

Valentin A. Yusim – Senior Researcher of the Laboratory of Experimental Modeling and Synthesis of Refractory Materials, National Research Center “Kurchatov Institute”;
e-mail: Yusim_VA@nrcki.ru;

Mihail Yu. Smetanin – PhD in Technical Sciences, Head of Radiation Transfer Laboratory, Ltd “Tehhnoim”;
e-mail: sm@lokip.ru;

Oleg K. Shaihatarov – Head of the Group of Software Systems, Ltd “Tekhnoim”; Head of Laboratory, Autonomous Non-Profit Organization “Center for Applied Computer Technologies”;
e-mail: ok@lokip.ru;

Alexey S. Samonov – Leading Specialist, Ltd “Tekhnoim”; Leadng Specialist, Autonomous Non-Profit Organization “Center for Applied Computer Technologies”;
e-mail: sa@lokip.ru.

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Саркисов С.Э., Рябченков В.В., Юсим В.А., Сметанин М.Ю., Шайхатаров О.К., Самонов А.С. Кристаллический класс соединений с перестраиваемым эффективным атомным номером Z для детекторов гамма-нейтронного диапазона // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2018. № 4. С. 122-126.

DOI: 10.18384/2310-7251-2018-4-122-126

FOR CITATION

Sarkisov S.E., Ryabchenkov V.V., Yusim V.A., Smetanin M.Yu., Shaihatarov O.K., Samonov A.S. Crystalline compounds with tunable effective atomic number Z for gamma and neutron detectors. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2018, no. 4, pp. 122-126.

DOI: 10.18384/2310-7251-2018-4-122-126