

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD627009>

Композитные материалы на основе квантовых точек и полимерных матриц для регистрации гамма-излучения в сцинтилляционных детекторах нового поколения

А.А. Кныш¹, В.В. Сосновцев¹, И.Р. Набиев^{1,2}, П.С. Самохвалов¹¹ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия;² Реймский университет Шампань — Арденны, Реймс, Франция

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В настоящее время разработка новых сцинтилляционных материалов на основе флуоресцентных нанокристаллов со структурой перовскита состава CsPbBr₃ и квантовых точек CdSe/ZnS является актуальной темой и развивается многими научными группами [1–4]. Оба указанных материала обладают высоким потенциалом для применения в этой роли, поскольку являются отличными флуорофорами с квантовым выходом люминесценции около 100%, но кроме того обладают и высокими значениями эффективного атомного номера Z_{eff} . Сечение фотоэффекта зависит от Z_{eff} как $(Z_{\text{eff}})^5$, а величина поглощения рентгеновских лучей зависит от Z_{eff} как $(Z_{\text{eff}})^4/(AE^3)$, где A — атомная масса вещества, поглощающего γ -квант, а E — энергия рентгеновского фотона [5].

Цель — разработать методику изготовления сцинтилляторов на основе квантовых точек и полимерных матриц, обладающих высокой степенью прозрачности, высокой временной стабильностью квантового выхода люминесценции и короткими временами затухания люминесценции (время высвечивания или среднее время жизни вещества в возбуждённом состоянии) для регистрации гамма-излучения.

Материалы и методы. Для регистрации сцинтилляционных сигналов использовался фотоэлектронный умножитель HAMAMATSU R7400U-6. В качестве источника ионизирующего излучения использовался источник ¹³⁷Cs с энергией γ -кванта 661,7 кэВ.

Результаты. При облучении γ -квантами изотопа ¹³⁷Cs образцов на основе матрицы поли(пара-метилстирола), шитого молекулами дивинилбензола (10% масс), активированных нафталином (10%, первичный акцептор), антраценом (1%) и квантовыми точками/перовскитными нанокристаллами (0,1–1,0%, переизлучатель) в энергетическом спектре проявлялось эффективное комптоновское рассеяние гамма-квантов в веществе на атомах, входящих в состав квантовых точек/перовскитных нанокристаллов.

В результате исследования было обнаружено, что для образцов, не содержащих неорганические элементы — квантовые точки и перовскитные нанокристаллы, — комптон-эффект для гамма-квантов отсутствует. Дополнительно показано, что матрица параметилстирола позволяет защитить перовскитные нанокристаллы от воздействия внешней среды, при этом значение квантового выхода фотолюминесценции объёмных композитных материалов на основе перовскитных нанокристаллов состава CsPbBr₃ и поли(параметилстирола) длительное время остаётся постоянным в пределах погрешности.

Заключение. Экспериментально подтверждено, что квантовые точки и перовскитные нанокристаллы, инкапсулированные в различные полимерные матрицы, проявляют свойства сцинтилляторов под воздействием ионизирующего излучения. Изготовленные образцы перовскитных нанокристаллов/квантовых точек и различных полимеров можно считать наиболее перспективными для использования в качестве сцинтилляционного материала для регистрации рентгеновского и гамма-излучения.

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2021-1413.

Ключевые слова: люминесценция; сцинтиллятор; квантовые точки; перовскитные нанокристаллы; CsPbBr₃; композитные материалы; полимерные матрицы; квантовый выход.

Как цитировать:

Кныш А.А., Сосновцев В.В., Набиев И.Р., Самохвалов П.С. Композитные материалы на основе квантовых точек и полимерных матриц для регистрации гамма-излучения в сцинтилляционных детекторах нового поколения // Digital Diagnostics. Т. 5, № S1. С. 130–132. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD627009>

Received: 15.02.2024

Accepted: 13.03.2024

Published online: 30.06.2024

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen Q., Wu J., Ou X., et al. All-Inorganic Perovskite Nanocrystal Scintillators // *Nature*. 2018. Vol. 561, N 7721. P. 88–93. doi: 10.1038/s41586-018-0451-1
2. Liu C., Li Z., Hajagos T.J., et al. Transparent Ultra-High-Loading Quantum Dot/Polymer Nanocomposite Monolith for Gamma Scintillation // *ACS Nano*. 2017. Vol. 11, N 6. P. 6422–6430. doi: 10.1021/acsnano.7b02923
3. Lee C.H., Son J., Kim T.-H., Kim Y.K. Characteristics of Plastic Scintillators Fabricated by a Polymerization Reaction // *Nuclear Engineering and Technology*. 2017. Vol. 49, N 3. P. 592–597. doi: 10.1016/j.net.2016.10.001
4. Létant S.E., Wang T.F. Semiconductor Quantum Dot Scintillation under γ -Ray Irradiation // *Nano Lett.* Vol. 6, N 12. P. 2877–2880. doi: 10.1021/nl0620942
5. Nikl M., Yoshikawa A. Recent R&D Trends in Inorganic Single-Crystal Scintillator Materials for Radiation Detection // *Advanced Optical Materials*. 2015. Vol. 3, N 4. P. 463–481. doi: 10.1002/adom.201400571

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD627009>

Composite materials based on quantum dots and polymer matrices for gamma radiation registration in the next-generation scintillation detectors

Alexander A. Knysh¹, Valery V. Sosnovtsev¹, Igor R. Nabiev^{1,2}, Pavel S. Samokhvalov¹

¹ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia;

² Université de Reims Champagne-Ardenne, Reims, France

ABSTRACT

BACKGROUND: The development of new scintillation materials based on fluorescent nanocrystals with a perovskite structure of CsPbBr₃ composition and CdSe/ZnS quantum dots is a pressing topic that is being pursued by numerous scientific groups [1–4]. Both of these materials have a high potential for application in this role due to their excellent fluorophore properties, with a quantum yield of luminescence of approximately 100%. Additionally, they possess high values of the effective atomic Zeff number. The photoelectric cross section is dependent on Zeff as (Zeff)⁵, while the magnitude of X-ray absorption is dependent on Zeff as (Zeff)⁴/(AE³), where A is the atomic mass of the substance absorbing the γ -quantum and E is the energy of the X-ray photon [5].

AIM: The aim of the study was to develop a technique for fabricating scintillators based on quantum dots and polymer matrices with a high degree of transparency, high temporal stability of luminescence quantum yield, and short luminescence decay times (time of illumination or average lifetime of the substance in the excited state) for gamma-ray registration.

MATERIALS AND METHODS: A HAMAMAMATSU R7400U-6 photomultiplier tube was employed to register scintillation signals. A ¹³⁷Cs source with a γ -quantum energy of 661.7 keV was used as a source of ionizing radiation.

RESULTS: At irradiation with γ -quanta of ¹³⁷Cs isotope samples based on poly(para-methylstyrene) matrix cross-linked with divinylbenzene molecules (10% wt%), activated with naphthalene (10%, primary acceptor), anthracene (1%) and quantum dots/perovskite nanocrystals (0, 1–1.0%, re-emitter), the energy spectrum showed effective Compton scattering of gamma-quanta in matter on atoms included in quantum dots/perovskite nanocrystals.

The study revealed that samples devoid of inorganic elements, including quantum dots and perovskite nanocrystals, do not exhibit the Compton effect for gamma-quanta. Furthermore, the paramethylstyrene matrix serves to safeguard perovskite nanocrystals from external influences. The photoluminescence quantum yield of bulk composite materials based on perovskite nanocrystals of the CsPbBr₃ composition and poly(paramethylstyrene) remains constant over an extended period, with minimal fluctuations within the margin of error.

CONCLUSIONS: Experimental evidence has demonstrated that quantum dots and perovskite nanocrystals encapsulated in various polymer matrices exhibit scintillator properties when subjected to ionizing radiation. The fabricated samples of perovskite nanocrystals/quantum dots and various polymers have been identified as the most promising candidates for use as scintillation material for the registration of X-ray and gamma radiation.

This study was supported by the grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, No. 075-15-2021-1413.

Keywords: luminescence; scintillator; quantum dots; perovskite nanocrystals; CsPbBr₃; composite materials; polymer matrices; quantum yield.

To cite this article:

Knysh A, Sosnovtsev V, Nabiev I, Samokhvalov P. Composite materials based on quantum dots and polymer matrices for gamma radiation registration in the next-generation scintillation detectors. *Digital Diagnostics*. 2024;5(S1):130–132. DOI: <https://doi.org/10.17816/DD627009>

REFERENCES

1. Chen Q, Wu J, Ou X, et al. All-Inorganic Perovskite Nanocrystal Scintillators. *Nature*. 2018;561(7721):88–93. doi: 10.1038/s41586-018-0451-1
2. Liu C, Li Z, Hajagos TJ, et al. Transparent Ultra-High-Loading Quantum Dot/Polymer Nanocomposite Monolith for Gamma Scintillation. *ACS Nano*. 2017;11(6):6422–6430. doi: 10.1021/acsnano.7b02923
3. Lee CH, Son J, Kim T-H, Kim YK. Characteristics of Plastic Scintillators Fabricated by a Polymerization Reaction. *Nuclear Engineering and Technology*. 2017;49(3):592–597. doi: 10.1016/j.net.2016.10.001
4. Létant SE, Wang TF. Semiconductor Quantum Dot Scintillation under γ -Ray Irradiation. *Nano Lett*. 2006;6(12):2877–2880. doi: 10.1021/nl0620942
5. Nikl M, Yoshikawa A. Recent R&D Trends in Inorganic Single-Crystal Scintillator Materials for Radiation Detection. *Advanced Optical Materials*. 2015;3(4):463–481. doi: 10.1002/adom.201400571

ОБ АВТОРАХ

*** Кныш Александр Александрович;**

ORCID: 0009-0006-6219-7568;

eLibrary SPIN: 1736-5666;

e-mail: knyshkikai@mail.ru

Сосновцев Валерий Витальевич;

ORCID: 0000-0001-6465-8280;

eLibrary SPIN: 9104-7190;

e-mail: vvsosnovtsev@mephi.ru

Набиев Игорь Руфаилович;

ORCID: 0000-0002-8391-040X;

eLibrary SPIN: 4223-0270;

e-mail: igor.nabiev@gmail.com

Самохвалов Павел Сергеевич;

ORCID: 0000-0002-2878-8376;

eLibrary SPIN: 1627-3857;

e-mail: p.samokhvalov@gmail.com

AUTHORS' INFO

*** Alexander A. Knysh;**

ORCID: 0009-0006-6219-7568;

eLibrary SPIN: 1736-5666;

e-mail: knyshkikai@mail.ru

Valery V. Sosnovtsev;

ORCID: 0000-0001-6465-8280;

eLibrary SPIN: 9104-7190;

e-mail: vvsosnovtsev@mephi.ru

Igor R. Nabiev;

ORCID: 0000-0002-8391-040X;

eLibrary SPIN: 4223-0270;

e-mail: igor.nabiev@gmail.com

Pavel S. Samokhvalov;

ORCID: 0000-0002-2878-8376;

eLibrary SPIN: 1627-3857;

e-mail: p.samokhvalov@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author