

УДК 53.083.94/.087; 621.039.531

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.03>*Оригинальная статья / Original paper*

Ядерно-оптический преобразователь для детектирования нейтронов

П.Б. Басков¹, Я.В. Глазюк¹, Г.В. Маричев², В.А. Степанов²¹АО «НИКИЭТ»

107140 Россия г. Москва, пл. Академика Доллежале, д. 1, к. 3

²ИАТЭ НИЯУ МИФИ,

249039 Россия, Калужская обл., г. Обнинск, тер. Студгородок, д. 1

Реферат. Для регистрации нейтронов *in situ* оптическим способом разработан ядерно-оптический преобразователь (ЯОП) с аргоном в роли люминофора и радиатором из FeV, конвертирующий нейтронный поток в поток высокоэнергетических продуктов ядерных реакций. Данные радиаторы получены методом твердофазного диффузионного насыщения бором сталей. Они обладают высокой радиационной стойкостью и механической прочностью, что делает их пригодными к эксплуатации при температурах до 1000°C. Экспериментально показана работоспособность ЯОП при выходе на мощность реактора ИВВ-2М при потоках нейтронов от $(9,5 \pm 1,9) \cdot 10^9$ до $(1,45 \pm 0,29) \cdot 10^{13}$ н·см⁻²·сек⁻¹ ($E < 0,625$ эВ). В измерениях получены оптические сигналы в виде спектров люминесценции с ЯОП при плотностях потока нейтронов от $(8,8 \pm 1,3) \cdot 10^{10}$ н/см², что соответствовало интенсивности свечения аргона $(0,10 \pm 0,01)$ мкВт/см² от ионизации α -частицами (1,47 МэВ) и ионами ⁷Li из слоев фазы FeV. Получены спектры индуцированной радиолуминесценции аргона в ЯОП при 300–600 нм, состоящие из более 20-ти линий. Показано пропорциональное изменение интенсивности радиолуминесценции ЯОП в зависимости от потока нейтронов в диапазоне значений, отличающихся более чем на два порядка.

Ключевые слова: детекторы нейтронов, ионизационная камера, ядерно-оптический преобразователь, спектр радиолуминесценции.

Для цитирования: Басков П.Б., Глазюк Я.В., Маричев Г.В., Степанов В.А. Ядерно-оптический преобразователь для детектирования нейтронов. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;2:33–39. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.03>

Введение

Для детектирования нейтронов в ядерных устройствах, как правило, используются газовые ионизационные камеры (ИК), в радиаторах которых используют материалы с взаимодействующими с нейтронами изотопами. В результате реакций с нейтронами

происходит ионизация рабочего газа ионами, продуктами ядерных превращений. Заряд ионизации газа попадает на электроды ИК и передается во внешнюю электрическую цепь [1]. Необходимость совершенствования имеющихся нейтронных детекторов связана с изменяющимися условиями работы радиационных устройств. В активной зоне реактора достигаются температуры до 700°C , потоки нейтронов до $10^{17} \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$, мощности дозы гамма-потоков до 10^4 Гр/с . В таких условиях в электрических системах возникают шумы, сравнимые с полезным сигналом, а при высоких температурах отсутствует пропорциональность в детектировании интенсивных радиационных потоков.

Одним из путей совершенствования нейтронной диагностики является расширение возможностей датчиков нейтронов на электрическом принципе работы за счет комбинаций с радиационно-люминесцентным детектированием в гибридной ИК или за счет полного перехода к системам радиационной фотоники. В системах радиационной фотоники можно достигать минимальных шумов при высоких температурах при сохранении пропорционального детектирования радиационных потоков в широком диапазоне значений. В работах [2–6] приведены исследования авторов по разработкам и применению различных элементов и устройств радиационной фотоники. Одним из них является детектор нейтронов на основе ядерно-оптического преобразователя (ЯОП).

ЯОП для автономного нейтронного контроля состоит из радиатора, конвертирующего нейтронный поток в поток высокоэнергетических продуктов ядерных реакций из рабочей среды (газовая, твердотельная) для преобразования энергии этих реакций в фотонный поток, и, наконец, из волоконно-оптического транслятора для передачи сигнала на регистрирующую аппаратуру (рис. 1). Разработка каждого элемента ЯОП представляет собой еще не решенную до конца к настоящему времени задачу. Варианты технологических решений по структурной организации на микро- и нано-масштабе волоконно-оптических трансляторов ЯОП при экстремальных внешних воздействиях приведены в работах [2, 3]. Разработаны радиационно стойкие, механически прочные, способные к эксплуатации при температурах до 1000°C радиаторы [4–6]. Такие радиаторы могут быть использованы как в обычных ИК, так и в гибридных газовых ИК, в которых сочетаются электрические и оптические способы регистрации нейтронов.

Целью работы является экспериментальное исследование работоспособности разработанного ЯОП в гамма- и нейтронных полях при корреляции между измеренными уровнями гамма- и нейтронного излучений и уровнями оптических сигналов, создаваемых ЯОП. Для этого были подготовлены ЯОП и устройство измерений в активной зоне исследовательского ядерного реактора (ИЯР) ИВВ-2М.

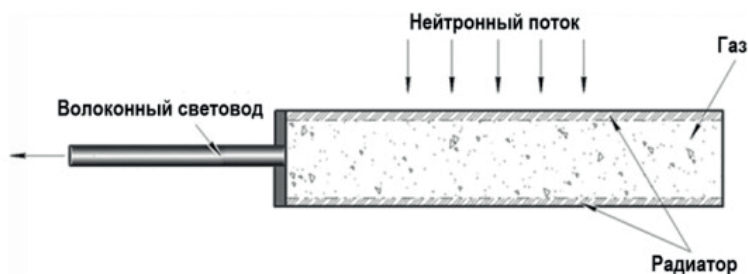


Рис. 1. Схема гибридной камеры деления на основе радиатора с активным к нейтронам изотопом (^{10}B , ^6Li , ^{235}U и др.) с волоконно-оптическим радиационно стойким транслятором фотонного сигнала [4]

Ядерно-оптический преобразователь (ЯОП)

Технология получения радиационно стойких и механически прочных радиаторных материалов основана на твердофазном диффузионном насыщении бором сталей [4 – 6]. ЯОП представлял собой герметичную ампулу из нержавеющей стали 12Х18Н10Т диаметром 6 мм и длиной чувствительного элемента 80 мм (рис. 2). На внутренней поверхности (радиатора) сформировано покрытие из FeV толщиной 40 – 50 мкм. Ампула заполнена инертным газом – аргоном – с давлением до 1 атм. В качестве рабочей среды ЯОП выбран аргон, так как свечение газа попадает в диапазон прозрачности красной и ближней инфракрасной областей кварцевых волоконно-оптических трансляторов. Внутри ампулы находился герметичный оптический выход для соединения с оптоволоконным транслятором.

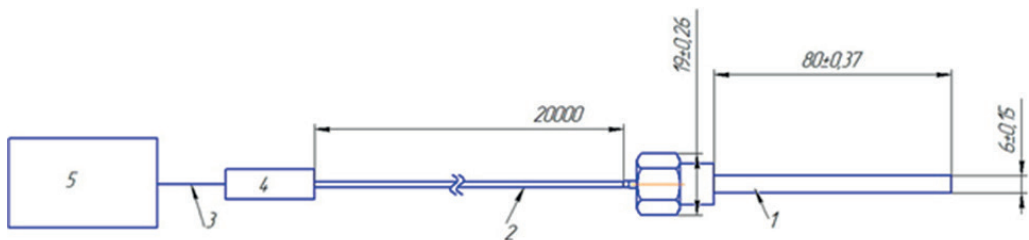


Рис. 2. Схема устройства с ЯОП: 1 – ядерный оптический преобразователь; 2 – оптоволоконный транслятор; 3 – USB-кабель; 4 – спектрометр FSD-10; 5 – ЭВМ

В ЯОП свечение аргона происходит в результате ионизации ионами, продуктами реакции $^{10}\text{B} + n^0 \rightarrow ^7\text{Li} \text{ (0,83 МэВ)} + \alpha \text{ (1,47 МэВ)} + \gamma \text{ (0,48 МэВ)}$.

Оптический сигнал радиолуминесценции к спектрометру FSD-10 передавался по кварцевому волокну типа «кварц-кварц» с световедущей жилой из чистого кварца и внешней фторидной отражающей оболочкой, длина волокна 20 м. Реакторные испытания ЯОП были проведены в составе штатного «сухого» канала АК-1 исследовательского реактора ИВВ-2М при продолжительности испытаний шесть часов. Потоки тепловых нейтронов и гамма-излучения в канале АК-1 изменялись пропорционально мощности реактора ИВВ-2М в диапазоне 0,1 – 15 МВт, составляли $(9,5 \pm 1,9) \cdot 10^9 - (1,45 \pm 0,29) \cdot 10^{13} \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ($E < 0,625 \text{ эВ}$) и $(0,10 \pm 0,02) - (224 \pm 44) \text{ Гр/с}$. Измерения происходили на протяжении всего этапа подъема тепловой мощности реактора.

Результаты измерений

При изменении мощности облучения минимальный оптический сигнал с ЯОП был зарегистрирован при плотности потока нейтронов $(8,8 \pm 1,3) \cdot 10^{10} \text{ н}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. С учетом [7] можно оценить поток α -частиц и ионов ^7Li из слоев фазы борида при такой плотности потока нейтронов $(16,7 \pm 4,5) \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ и $(6,3 \pm 0,9) \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$.

Спектры радиолуминесценции ЯОП, соответствующие разным потокам нейтронов, показаны на рис. 3. Спектры соответствуют радиолуминесценции аргона при 300–600 нм. Дуговой и искровой спектры аргона состоят из многих линий (около 900), расположенных в спектральной области между 400 и 706 нм [8, 9]. Согласно

[10], спектр излучения искрового разряда аргона характеризуется интенсивным линейчатым и рекомбинационным излучением с длительностью вспышек до 10^{-8} с в диапазоне длин волн до 600 нм. На рисунке 3 можно видеть всего около 20-ти линий, которые относятся к люминесценции плазмы аргона. Видно изменение относительных интенсивностей линий люминесценции коротких и длинных волн с увеличением интенсивности облучения. Это происходит в результате гамма-наведенных оптических потерь в синей области спектра в волоконном трансляторе системы регистрации.

На рисунке 4 показано изменение интенсивности свечения аргона ЯОП на длине волны 450 нм в зависимости от потока нейтронов. Зависимость приведена в логарифмических координатах. Можно видеть пропорциональное детектирование радиационного потока в диапазоне значений, превышающем два порядка.

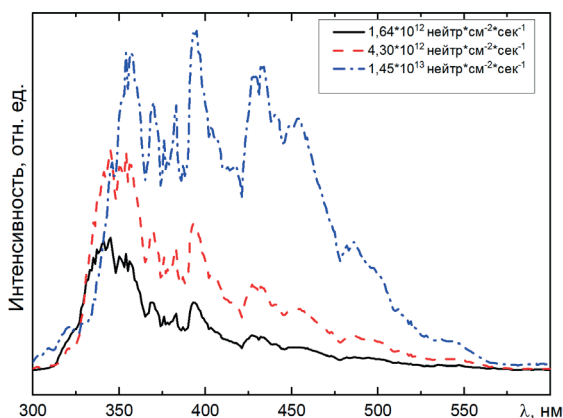


Рис. 3. Спектры радиолюминесценции аргона в ЯОП в зависимости от потока нейтронов в канале реактора

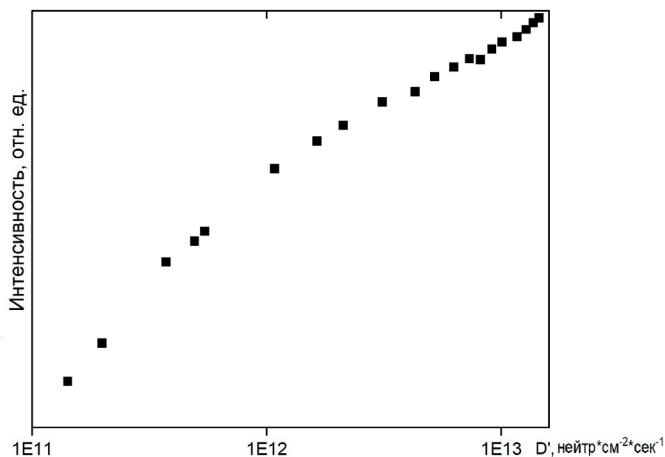


Рис. 4. Интенсивность свечения аргона в ЯОП на длине волны 450 нм в зависимости от потока нейтронов ($E < 0,625$ эВ)

Заключение

В [3] было сделано предположение о том, что в гибридной ИК с улавливанием излучения радиолюминесценции в волокно возможна регистрация нейтронного потока начиная с 10^{10} н/(см²с). При этом при такой плотности потока тепловых нейтронов 10^{10} н/(см²с) интегральная интенсивность свечения аргона от ионизации α -частицами и ионами ${}^7\text{Li}$ из слоев фазы FeV должна составлять $(0,10 \pm 0,01)$ мкВт/см². В настоящих измерениях получен оптический сигнал с ЯОП при плотности потока нейтронов $8,8 \cdot 10^{10}$ н/(см²с), что соответствует интенсивности свечения аргона $(0,9 \pm 0,1)$ мкВт/см². Это можно считать удовлетворительной корреляцией с учетом потерь при передаче оптического сигнала от ЯОП к спектрометру через кварцевое волокно.

Таким образом, экспериментально показана работоспособность ЯОП на основе аргона и радиаторов из FeV для регистрации потока нейтронов *in situ* при выходе на мощность реактора ИВВ-2М.

Благодарности

Авторы благодарят сотрудников группы физики реактора ИВВ-2М отдела эксплуатации исследовательской ядерной установки АО «ИРМ» за помощь в проведении измерений.

Литература

1. Малышев Е.К., Засадыч Ю.Б., Стабровский С.А. Газоразрядные детекторы для контроля ядерных реакторов. М.: Энергготомиздат, 1991, 160 с.
2. Сахаров В.В., Басков П.Б., Берикашвили В.Ш., Ивкина О.В., Косов Д.Е., Мосягина И.В., Фролов Н.Н., Шарипова М.А. Оксидная наноразмерная модификация поверхности неорганических материалов. *Наноинженерия*. 2011;6:15–25.
3. Сахаров В.В., Мосягина И.В., Басков П.Б., Степанов В.А. Физико-материаловедческая комбинаторика пленочно-стекловолоконных материалов для радиационно-люминесцентного детектирования нейтронных потоков. *Вопросы радиационной безопасности*. 2016;2(82):55–63.
4. Сахаров В.В., Маричев Г.В., Басков П.Б., Степанов В.А. Ядерно-оптические преобразователи для детектирования сильных нейтронных полей. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2021;4:122–134. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.11>
5. Басков П.Б., Маричев Г.В., Сахаров В.В., Степанов В.А. Гибридные камеры для детектирования нейтронных полей. Материалы XIV Всероссийской научной конференции «Технологии и материалы для экстремальных условий», 16–20 сентября 2019 г., Агой, Россия. М.: МЦАИ РАН, 2019, с. 332–336. DOI: 10.26103/MZ.2019.62.63.049
6. Маричев Г.В., Степанов В.А. Разработка электродов гибридных ионизационных камер деления. XV Международный семинар «Структурные основы модифицирования материалов». Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2021, с. 163–164.
7. McLane V. EXFOR Basis. A Short Guide to the Nuclear Reaction Data Exchange Format. BNL-NCS/05-Rev., 2000. DOI: <https://doi.org/10.2172/767143>
8. Стриганов А.Р., Свентицкий Н.С. Таблицы спектральных линий. М.: Атомиздат, 1966, 900 с.
9. Физические величины: Справочник (Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова). М.: Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.

10. Омаров О.А., Омарова Н.О., Омарова П.Х., Рамазанова А.А., Аль-Харети Ф.М.А., Хачалов М.Б. Спектроскопия плазмы искрового пробоя газов в сильных магнитных полях. *Инженерная физика*. 2013;5:50–58.

Поступила в редакцию 22.04.2025

После доработки 29.05.2025

Принята к опубликованию 10.06.2025

Авторы

Басков Петр Борисович, начальник лаборатории, к.т.н.,

E-mail: baskov58@mail.ru

Глазюк Яков Вадимович, заместитель генерального директора, главный конструктор

E-mail: Jackov@list.ru

Маричев Глеб Владиславович, старший преподаватель,

E-mail: marichevgv@oiate.ru

Степанов Владимир Александрович, начальник отделения, профессор, д.ф.-м.н.,

E-mail: stepanov@iate.obninsk.ru

UDC 53.083.94/.087; 621.039.531

Nuclear Optical Converter for Neutron Detection

Baskov P.B.¹, Glazyuk Ya.V.¹, Marichev G.V.², Stepanov V.A.²

¹ JSC "NIKIET",

1, bld. 3 Acad. Dollezhal Sq., 107140 Moscow, Russia

² IATE МЕРФИ,

1 Studgorodok ter., 249039 Obninsk, Kaluga reg., Russia

Abstract

A nuclear-optical converter (NOC) with argon and a FeB radiator has been developed for in situ optical neutron detection. A NOC for autonomous neutron monitoring consists of a radiator converting a neutron flux into a flux of high-energy nuclear reaction products, a working medium (gas, solid) for converting the energy of these reactions into a photon flux, and a fiber-optic translator for transmitting a signal to the recording equipment. These radiators were obtained by solid-phase diffusion saturation of steels with boron. They have high radiation resistance and mechanical strength, which makes them suitable for operation at temperatures up to 1000°C. Such radiators can be used both in conventional IRs and in hybrid gas IRs, which combine electrical and optical methods of neutron detection. The performance of the NOP at the IVV-2M reactor power output was demonstrated experimentally at neutron fluxes from $9.5 \cdot 10^9$ to $1.45 \cdot 10^{13}$ n cm⁻² sec⁻¹ ($E < 0.625$ eV). Optical signals in the form of luminescence spectra were obtained in measurements with the NOP at neutron flux densities from $8.8 \cdot 10^{10}$ n cm⁻² sec⁻¹, which corresponded to an argon glow intensity of $0.1 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ from ionization by α -particles (1.47 MeV) and ^7Li ions from FeB phase layers. Spectra of induced radioluminescence of argon in the NOP at 300–600 nm were obtained, consisting of more than 20 lines. The proportional change in the intensity of the radioluminescence of the NOP is shown depending on the neutron flux in a range that includes values that differ by more than two orders of magnitude.

Keywords: neutron detectors, ionization chamber, nuclear optical converter, radioluminescence spectrum.

For citation: Baskov P.B., Glazyuk Ya.V., Marichev G.V., Stepanov V.A. Nuclear Optical Converter for Neutron Detection. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;2:33–39. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.03> (in Russian).

References

1. Malyshev E.K., Zasadych Yu.B., Stabrovsky S.A. Gas Discharge Detectors for Monitoring Nuclear Reactors. Moscow. Energatomizdat Publ., 1991, 160 p. (in Russian).
2. Sakharov V.V., Baskov P.B., Berikashvili V.Sh., Ivkina O.V., Kosov D.E., Mosyagina I.V., Frolov N.N., Sharipova M.A. Oxide Nanoscale Modification of the Surface of Inorganic Materials. *Nanoinzheneriya*. 2011;6:15–25 (in Russian).
3. Sakharov V.V., Mosyagina I.V., Baskov P.B., Stepanov V.A. Physics and Materials Science Combinatorics of Film Fiberglass Materials for Radiation Luminescent Detection of Neutron Fluxes. *Journal of Radiation Safety Issues*. 2016;2(82):55–63 (in Russian).
4. Sakharov V.V., Marichev G.V., Baskov P.B., Stepanov V.A. Nuclear-optical converters for detecting strong neutron fields. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2021;4:122–134. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.11> (in Russian).
5. Baskov P.B., Marichev G.V., Sakharov V.V., Stepanov V.A. Hybrid cameras for detecting neutron fields. Proc. of the XIV-th All-Russian Scientific Conference «Technologies and Materials for Extreme Conditions» Sept. 16–20, 2019, Agoy, Russia. Moscow. MTsAI RAN Publ., 2019, pp. 332–336. DOI: 10.26103/MZ.2019.62.63.049 (in Russian).
6. Marichev G.V., Stepanov V.A. Development of electrodes for hybrid ionization fission chambers. Thes. XV international seminar “Structural foundations of materials modification”. Obninsk, IATE MEPhI Publ., 2021, pp. 163–164 (in Russian).
7. McLane V. EXFOR Basis. A Short Guide to the Nuclear Reaction Data Exchange Format. BNL-NCS/05-Rev. 2000. DOI: <https://doi.org/10.2172/767143>
8. Striganov A.P., Sventitsky N.S. Tables of spectral lines. Moscow. Atomizdat Publ., 1966, 900 p. (in Russian).
9. Physical quantities: Handbook (Eds. I.S. Grigorieva, E.Z. Meilikhova). Moscow. Energoatomizdat Publ., 1991, 1232 p. (in Russian).
10. Omarov O.A., Omarova N.O., Omarova P.Kh., Ramazanov A.A., Al Khareti F.M.A., Khachalov M.B. Plasma Spectroscopy of Spark Breakdown of Gases in Strong Magnetic Fields. *Inzhenernaya Fizika*. 2013;5:50–58 (in Russian).

Authors

Pyotr B. Baskov, Head of the Laboratory, Cand. Sci. (Engineering),
E-mail: baskov58@mail.ru

Yakov V. Glazyuk, Deputy General Director, Chief Designer,
E-mail: Jackov@list.ru

Gleb V. Marichev, senior lecturer,
E-mail: marichevgv@oiate.ru

Vladimir A. Stepanov, Head of Department, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
E-mail: stepanov@iate.obninsk.ru