ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА И ИНЖИНИРИНГ, 2024, том 15, № 3, с. 273–281

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ШИРОКОПОЛОСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЛИНЕЙНОМ УСКОРИТЕЛЕ ЛИНАК-200

© 2024 г. А. А. Балдин[a, b], В. В. Кобец[a], В. В. Блеко[a, b], Н. В. Чернега[c], С. Ф. Уманская[c], М. А. Шевченко[c], Т. В. Миронова[c], А. Д. Кудрявцева[c], М. А. Карпов[c, *], М. В. Тареева[d], Н. А. Клеопова[e], Ю. Б. Базаров[f], А. А. Христенко[f]

[a] *Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., 141980 Россия*
[b] *ООО Институт перспективных исследований "Омега", Дубна, Московская обл., 141986 Россия*
[c] *Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, 119991 Россия*
[d] *Российский технологический университет "МИРЭА", Москва, 119454 Россия*
[e] *ООО "Даймонд Вижен", Москва, 109235 Россия*
[f] *ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Нижегородская обл., 607188 Россия*
**E-mail: maksim.karpov@gmail.com*

Поступила в редакцию 30.06.2023 г.
После доработки 30.06.2023 г.
Принята к публикации 17.07.2023 г.

Рассмотрены возможности применения упорядоченных трехмерных матриц фотонных кристаллов для генерации гигагерцового, оптического и нейтронного излучений при взаимодействии с ними пучка высокоэнергетических электронов. Показаны оптические спектры высвечивания фотонных кристаллов при взаимодействии с ними пучка релятивистских электронов. Проведены эксперименты по получению двумерных изображений объектов в гамма- и нейтронных потоках при взаимодействии пучка электронов с материалом фотонного кристалла. В работе рассмотрены различные нейтроногенерирующие мишени, для которых были рассчитаны соответствующие выходы нейтронов. Полученные в результате эксперимента характеристики электромагнитных и нейтронных полей также приведены в статье.

Ключевые слова: электронный пучок, фотонный кристалл, спектр излучения
DOI: 10.56304/S2079562923030053

ВВЕДЕНИЕ

В рамках коллаборации FLAP в ОИЯИ [1] в настоящее время ведутся исследования взаимодействия высокоэнергетических пучков электронов с метаматериалами. Трехмерные фотонные кристаллы, состоящие из глобул плотно упорядоченных сфер диоксида кремния с характерными диаметрами в диапазоне от 10 нм до нескольких мкм, являются инструментом для решения важных задач по генерации как оптического, так и терагерцового излучений при прохождении вблизи их поверхности пучка заряженных частиц [2]. Также нейтронные потоки высокой интенсивности получают при взаимодействии пучка электронов определенных энергий с мишенями различного состава в области электроядерных, фотоядерных реакций и в области гигантского дипольного резонанса (несколько десятков мегаэлектронвольт). Для разделения широкого нейтронного спектра по энергиям и для получения моноэнергетических нейтронов можно применять трехмерные фотонные кристаллы как дифракционную решетку для тепловых нейтронов по аналогии с монохроматором. В ряде случаев эффективность такой решетки оказывается на порядок выше традиционной двумерной, изготовленной методом фотолитографии [3].

В настоящей работе представлены результаты измерений оптических, нейтронных и СВЧ спектров излучения, генерируемых при взаимодействии электронных пучков с мишенями в виде фотонных кристаллов в различных режимах облучения и при различных температурах, в том числе криогенных. Показано, что спектры нейтронов, генерируемые электронным пучком из монокристаллических бинарных, тройных и других монокристаллов сложного состава, качественно отличаются от нейтронных спектров, полученных из мишеней моносостава и впоследствии прошедших через нейтронную дифракционную решетку на основе трехмерного фотонного кристалла. Также показано, что электромагнитное излучение, получаемое на выходе из фотонного кристалла при

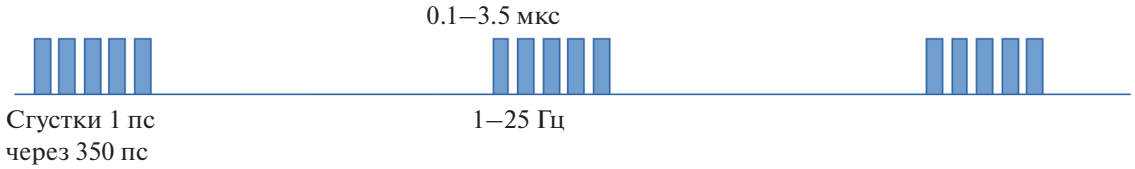

Рис. 1. Временная структура пучка электронов линейного ускорителя ЛИНАК-200.

его бомбардировке электронным пучком, имеет ряд характерных пиков в спектре, чего не наблюдается при бомбардировке пучком металлических мишеней однородного состава. Полученные результаты расширяют полученные ранее данные [4].

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

С 2020 г. в Объединенном Институте Ядерных Исследований (ОИЯИ) г. Дубна в рамках коллаборации FLAP ведутся работы по созданию источников излучения СВЧ, терагерцового и нейтронного излучения с перестраиваемым спектром, генерируемых пучком релятивистских электронов, проходящих вблизи упорядоченных сред (метаматериалов). В настоящее время используемый для получения пучков релятивистских электронов линейный ускоритель ЛИНАК-200 [5] имеет следующие характеристики:

• энергия электронов 20–200 МэВ, с плавной регулировкой. Разброс по энергии в пучке ~1%;

• два канала вывода пучка: 20 МэВ и 20–200 МэВ (представляющий наибольший интерес для рассматриваемых задач). Пучок выводится в атмосферу;

• временная структура пучка ускоренных электронов приведена на рис. 1;

• ток пучка в импульсе 0–40 мА (от 10^2 до 10^{13} электронов/с). Максимальный средний ток 2.5 мкА;

• мощность поглощенной дозы от 500 мкГр/ч до 20 МГр/ч;

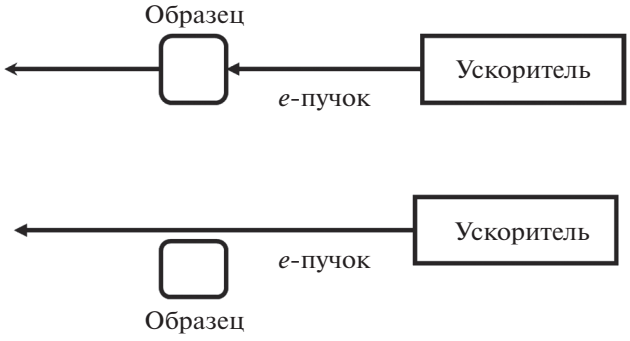

Рис. 2. Геометрия эксперимента: пучок проходит через образец (сверху) и вблизи его поверхности (снизу).

• поперечный размер выведенного пучка без фокусировки ~5 мм, с фокусировкой ~0.5 мм.

Ранее нами было показано [4, 6, 7], что применение метаматериалов типа фотонного кристалла в качестве излучателя когерентного излучения при воздействии на него электрического поля представляет достаточно простой способ получения перестраиваемых по частоте источников излучения в электромагнитной области спектра, включая как гигагерцовый диапазон, так и оптический, и рентгеновский.

Другой особенностью такого рода метаматериалов является их высокоупорядоченная структура поверхности, что позволяет их использовать в качестве не только преобразователей спектра и дифракционных элементов, но и в качестве эффективных источников индуцированного излучения при прохождении вблизи их поверхности пучка релятивистских электронов. Это связано с быстрой переориентацией и последующей релаксацией дипольных моментов полярного диэлектрика, сопровождающегося испусканием кванта излучения.

Нами была проведена серия экспериментов с использованием ряда метаматериалов типа фотонных кристаллов различного состава и морфологии при воздействии на них электронного пучка из ускорителя. Эксперименты проводились в двух постановках: при взаимодействии электронного пучка непосредственно с объемом кристалла и при прохождении его вблизи поверхности кристалла (рис. 2). При взаимодействии электронного пучка релятивистской энергии с объемом кристалла (мишени) происходит ряд ядерных реакций, в том числе электроядерная, сопровождающаяся испусканием потока нейтронов. При прохождении электронного пучка вблизи поверхности упорядоченного фотонного кристалла происходит генерация электромагнитного излучения и излучения Смита-Парселла. Для регистрации генерируемого электромагнитного излучения использовалась октавная рупорная антенна 4–8 ГГц, подключенная к осциллографу TektronixMSO 64 8 ГГц. Антенна устанавливалась на вращающийся вокруг фотонного кристалла гониометр (рис. 3).

Для регистрации нейтронных потоков из кристалла использовался нейтронночувительный детектор с сцинтиллятором на основе обогащенного изотопом ^{6}Li стекла и стильбеном. Детекторы

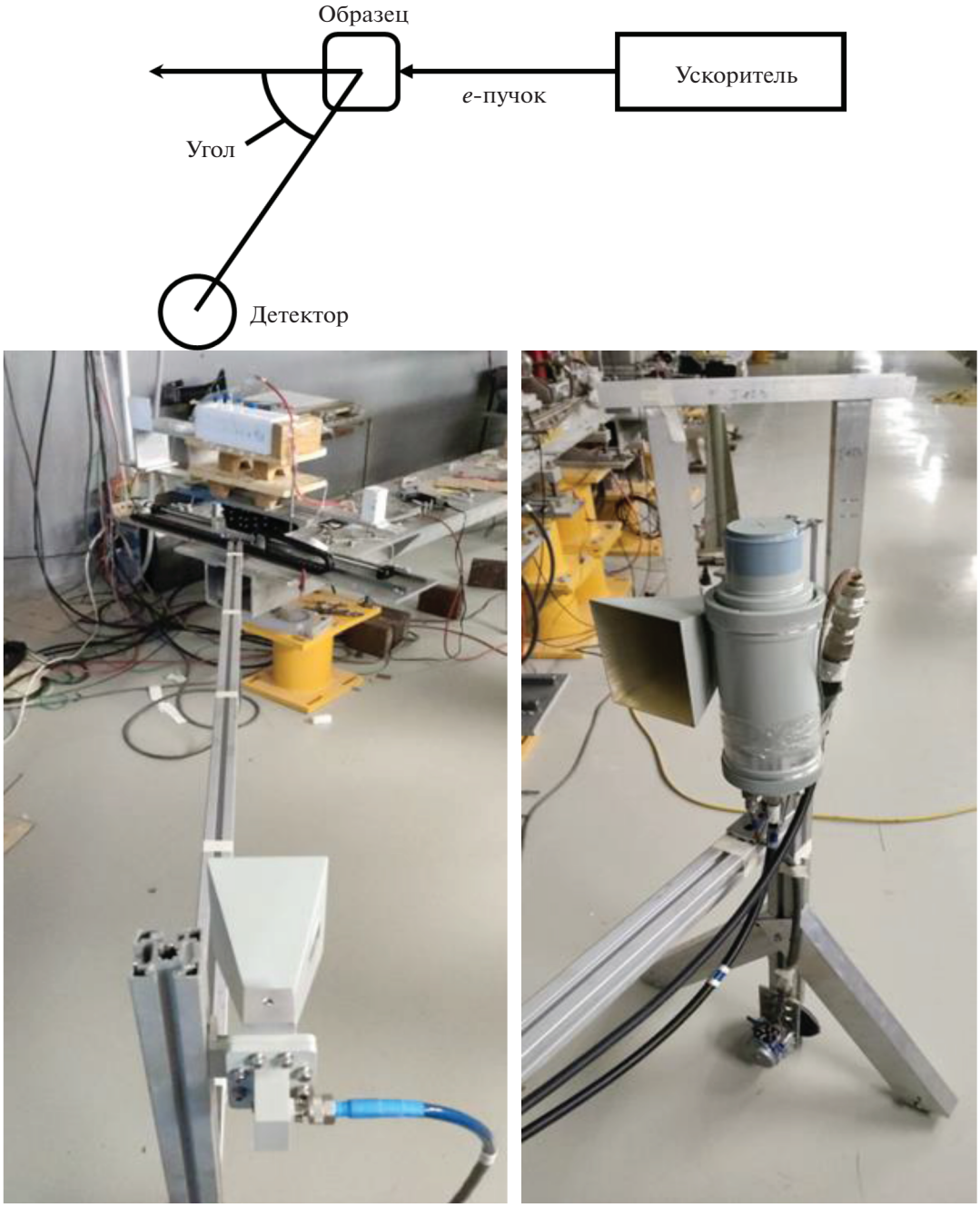

Рис. 3. Сверху – схема установки гониометра с антенной и нейтронным детектором. Снизу – антенна и детектор, установленные на гониометре.

подключались как к осциллографу, так и к дигитайзеру CAEN, работающему в режиме дискриминатора по форме импульса (Pulse Shaping Discrimination).

Для сравнительного анализа испускаемых нейтронных спектров из фотонных кристаллов и гомогенных мишеней была использована времяпролетная схема, состоящая из двух детекторов, размещенных на различном расстоянии друг от друга. Пучок электронов из ускорителя ЛИНАК-200 с энергией 200 МэВ и током 100 мА бомбардировал поочередно устанавливаемые на выходе из ускорителя мишени из различных материалов, смена мишеней осуществлялась дистанционно из пультовой посредством программно-управляемого контроллера шагового двигателя (рис. 4).

Для генерации нейтронов использовались гомогенные мишени из железа, вольфрама, свинца

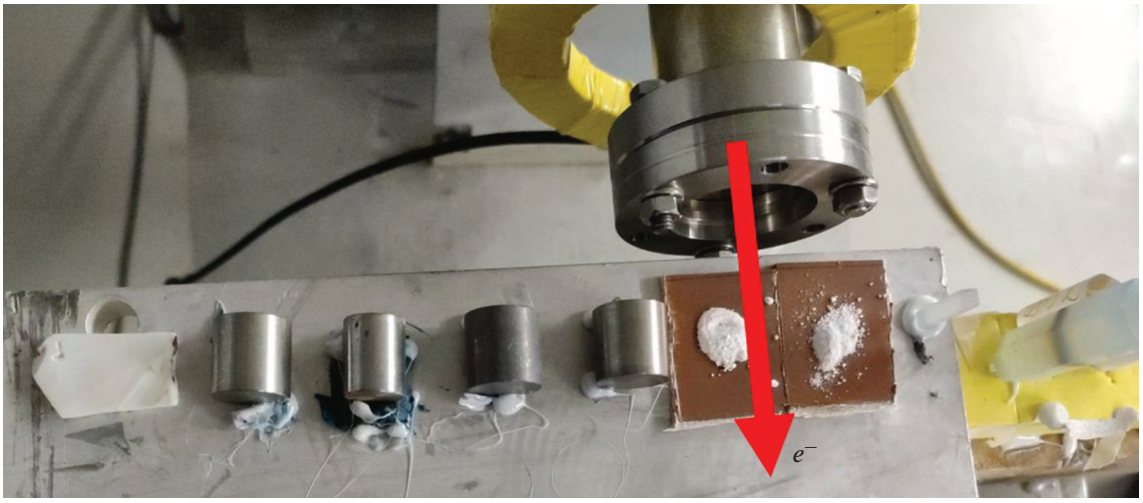

Рис. 4. Образцы, размещенные на моторизованной подвижке и направление хода электронного пучка.

и бериллия. Нейтронные времяпролетные детекторы устанавливались на расстоянии 5, 10 и 30 м от мишени. Антенна и нейтронный детектор на гониометре устанавливались на расстоянии 3 м от мишени.

В табл. 1 приведены результаты моделирования нейтронных выходов из гомогенных мишеней различной конфигурации в программном пакете Geant4. Расчет нейтронных выходов из фотонного кристалла не представлялся возможным, поскольку для объекта такой сложной морфологии отсутствуют соответствующие библиотеки.

Сравнение приведенных в табл. 1 данных показывает, что для получения наибольших потоков нейтронов, предпочтительным является использование мишеней малых размеров и нейтронного потока в переднюю полусферу.

Наибольший поток нейтронов в области энергий $E_n > 0.4$ кэВ в направлении передней полусферы может быть получен при ее облучении электронами с энергией 200 МэВ вольфрамовой мишени, при этом поток должен составить порядка 10^{11} нейтронов/с.

Одновременно в эксперименте регистрировались оптические спектры люминесценции фотонных кристаллов. Состав и морфология использованных кристаллов приведены в табл. 2.

На рис. 5 представлены полученные оптические спектры люминесценции порошков алмаза и оксида цинка. Обращает на себя внимание линейчатый спектр люминесценции, обусловленный, по-видимому, структурой активной среды, а также образованием конгломератов из частиц порошка при их взаимодействии с электронным пучком. Анализ морфологии порошка диоксида кремния, проведенный на электронном микроскопе до и после облучения электронным пучком, представлен на рис. 6. Обращает на себя внимание деформация глобул и их слипание после воздействия электронного пучка, что обусловлено, по-видимому, сильным пондеромоторным взаимодействием электрического поля пучка с дипольными моментами глобул.

Было проведено исследование влияния температуры кристалла на его люминесценцию. Известно, что понижение температуры среды существенно повышает световой выход люминесценции при возбуждении среды лазерным излучением [8]. При воздействии на фотонный кристалл электронного пучка нами наблюдалась похожая картина, но с некоторыми отличиями (рис. 7). Отметим, что ин-

Таблица 1. Выходы нейтронов для W и Pb мишеней, нормированные на один электрон

Тип мишени, R/L (мм)	Задняя полусфера	Передняя полусфера
W мишень, 30/100	0.0195	0.00075
W мишень, 10/20	0.0079	0.0083
Pb мишень, 30/100	0.014	0.0021
Pb мишень, 10/20	0.0047	0.0069

Таблица 2. Состав и морфология используемых образцов

Состав образца	Морфология	Размеры частиц (глобул)
Алмаз	Порошок	10 нм
Алмаз	Порошок	25–50 нм
ZnO	Порошок	20–40 нм
TiO_2	Порошок	5 мкм
$LiNbO_3$	Монокристалл	
SiO_2	Монокристалл	
SiO_2	Фотонный кристалл	50 нм

тенсивность люминесценции в переднюю и заднюю полусферы существенно отличалась. При этом в спектре люминесценции наблюдаются пики, соответствующие положению краев фотонной запрещенной зоны, соизмеримые с размером глобулы кристалла.

При измерении спектра СВЧ сигнала из образцов на нем явно видны узкополосные максимумы, соответствующие собственным акустическим частотам глобул (рис. 8). При воздействии пучка на монокристаллы, не обладающие структурой метаматериала, подобных пиков не наблюдается. Для измерения нейтронных спектров по методу времени пролета (Time-of-Flight) нейтронные детекторы были экранированы свинцовыми кирпичами для подавления фона гамма-излучения. На рис. 9 представлены времяпролетные спектры нейтронного потока от различных мишеней. Полученные нейтронные спектры позволяют говорить о наличии в индуцированном излучении некоторого количества нейтронов, что позволяет, в свою очередь, произвести съемку объектов в нейтронном потоке, т.е. реализовать метод нейтронной радиографии [9, 10]. Нейтронная радиография основана на тех же принципах, что и рентгеновская. Однако, в отличие от рентгеновского излучения, нейтронные потоки в большей степени ослабляются материалами, содержащими легкие элементы, такими, как водород, углерод, бор и литий, и проникают во многие материалы из тяжелых элементов, такие, как вольфрам и свинец (рис. 10).

Также, в отличие от рентгеновского излучения, ослабление нейтронного потока в толще вещества зависит от его изотопного состава, что позволяет

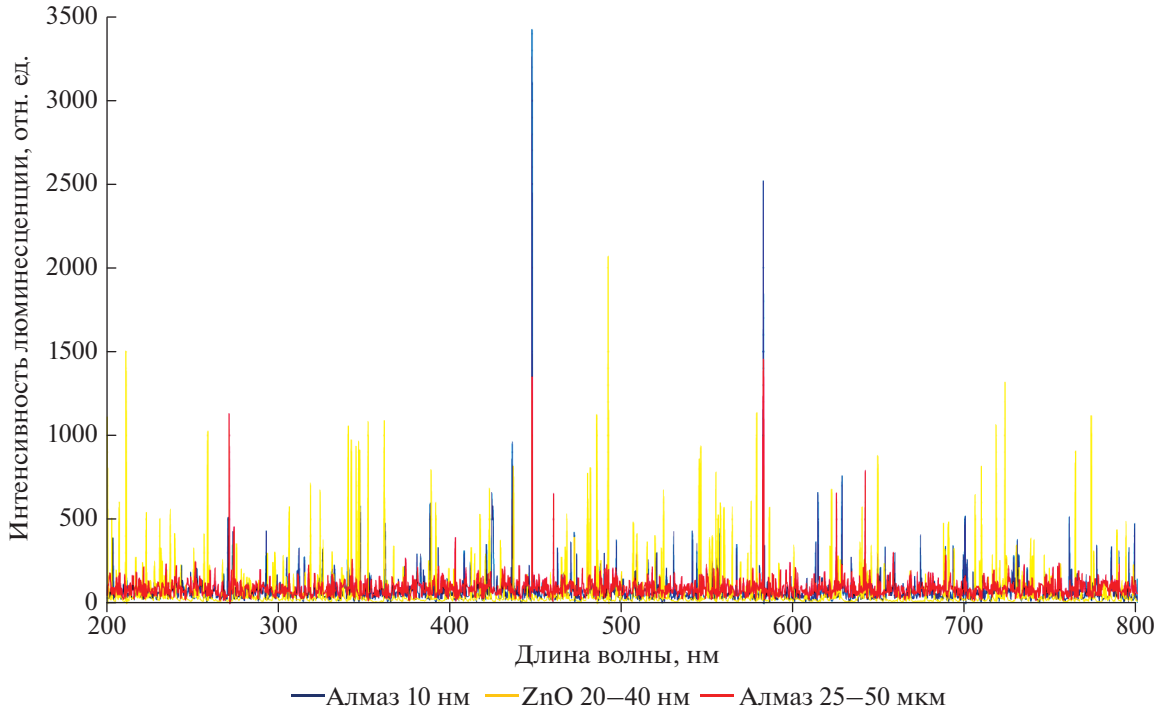

Рис. 5. Спектры люминесценции некоторых образцов при воздействии электронного пучка.

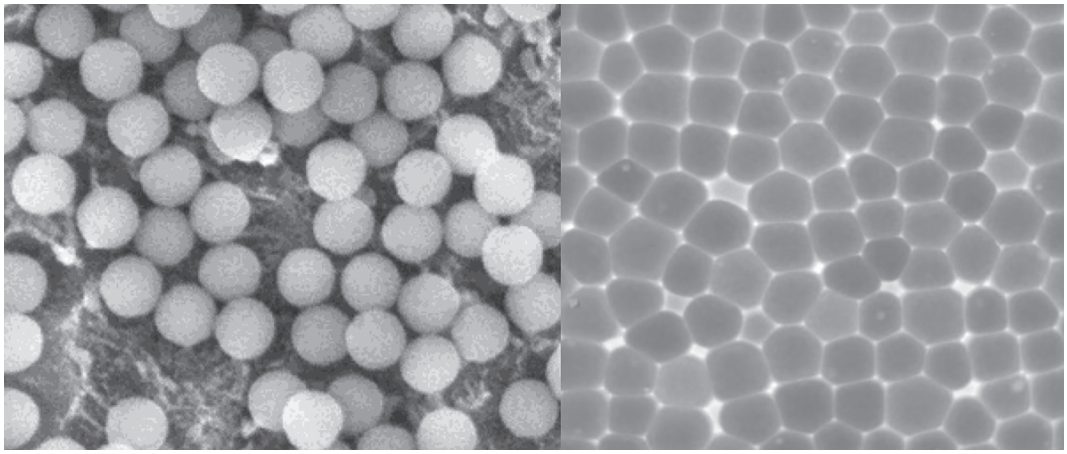

Рис. 6. Структура образца SiO_2 50 нм до (слева) и после (справа) облучения электронным пучком.

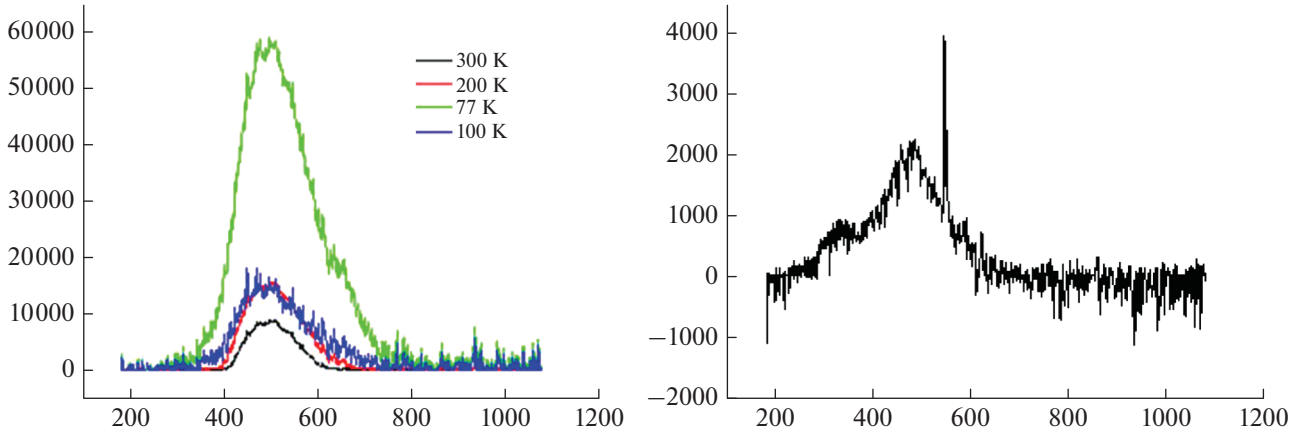

Рис. 7. Спектры люминесценции фотонного кристалла SiO_2 при криогенной температуре (слева) и пик люминесценции, соответствующий стоп-зоне фотонного кристалла (справа).

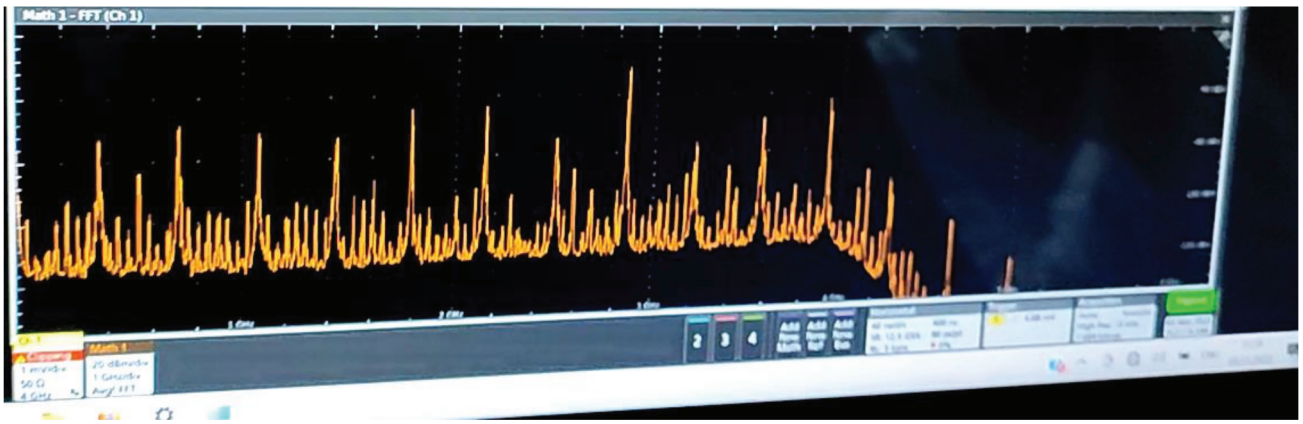

Рис. 8. Радиочастотный спектр фотонного кристалла SiO_2, зарегистрированный рупорной антенной.

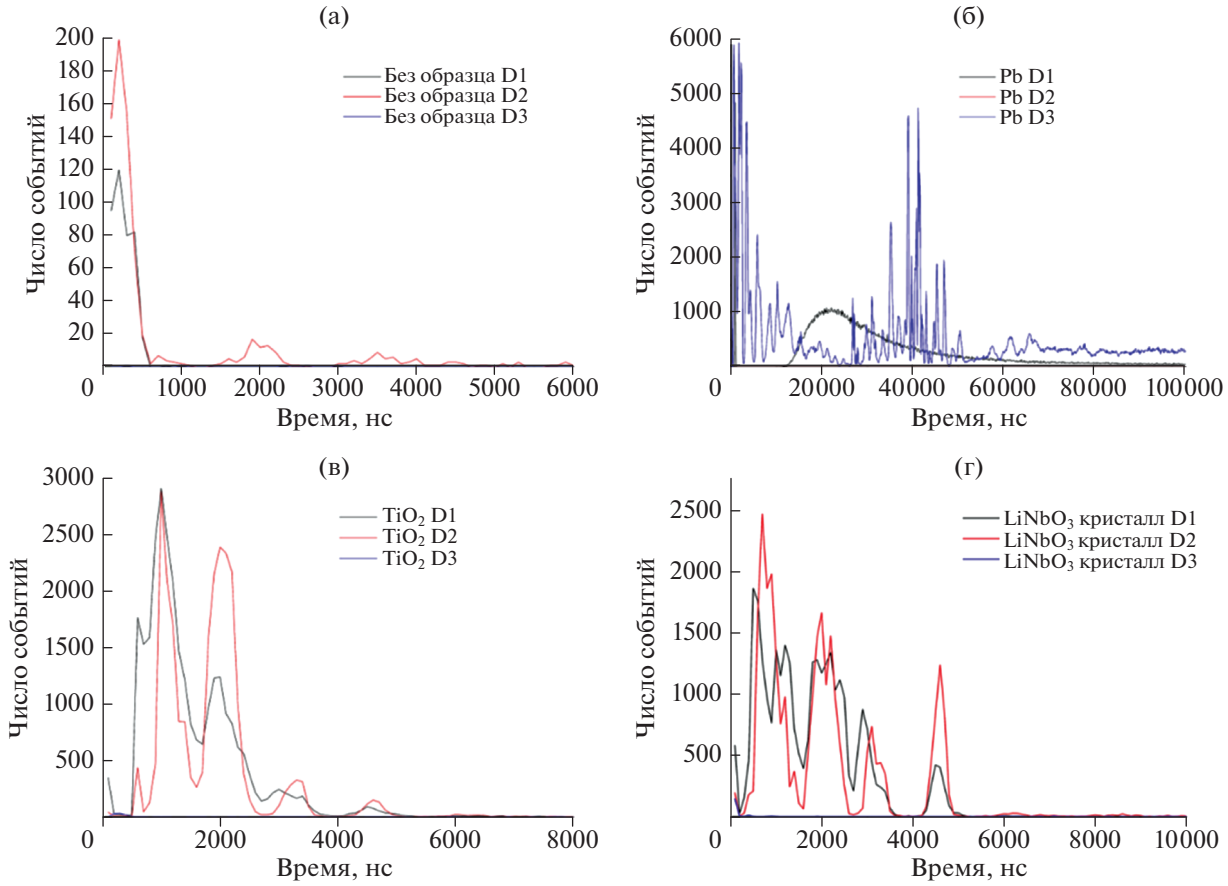

Рис. 9. Нейтронные спектры: (а) без образца; (б) мишень из гомогенного свинца; (в) TiO_2; (г) $LiNbO_3$ монокристалл.

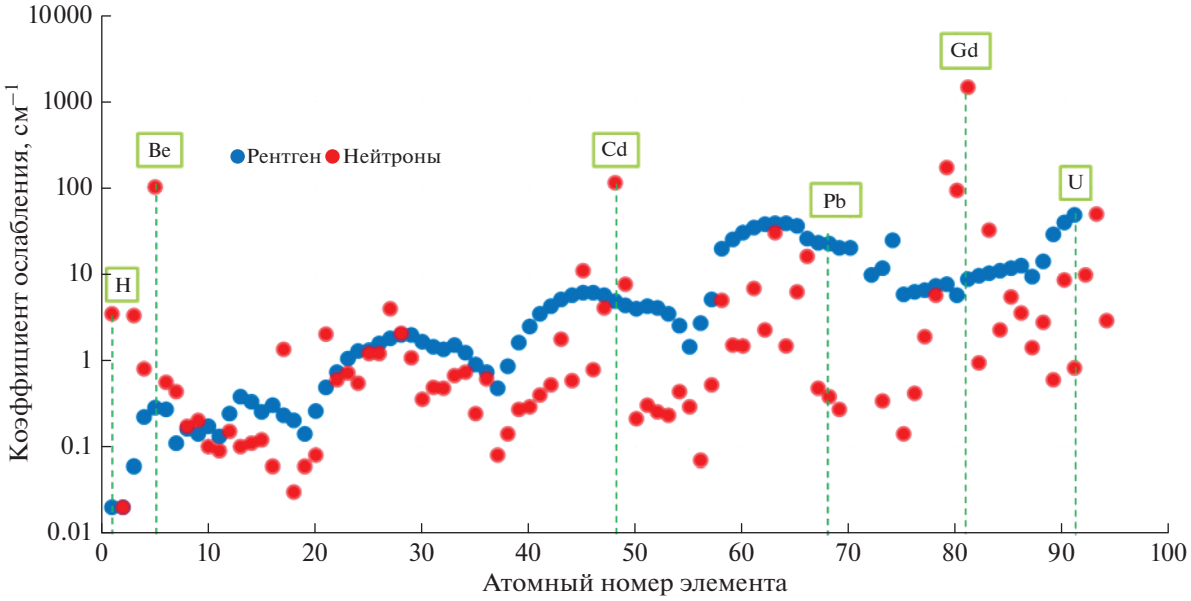

Рис. 10. Поглощение тепловых нейтронов и рентгеновского излучения различными элементами.

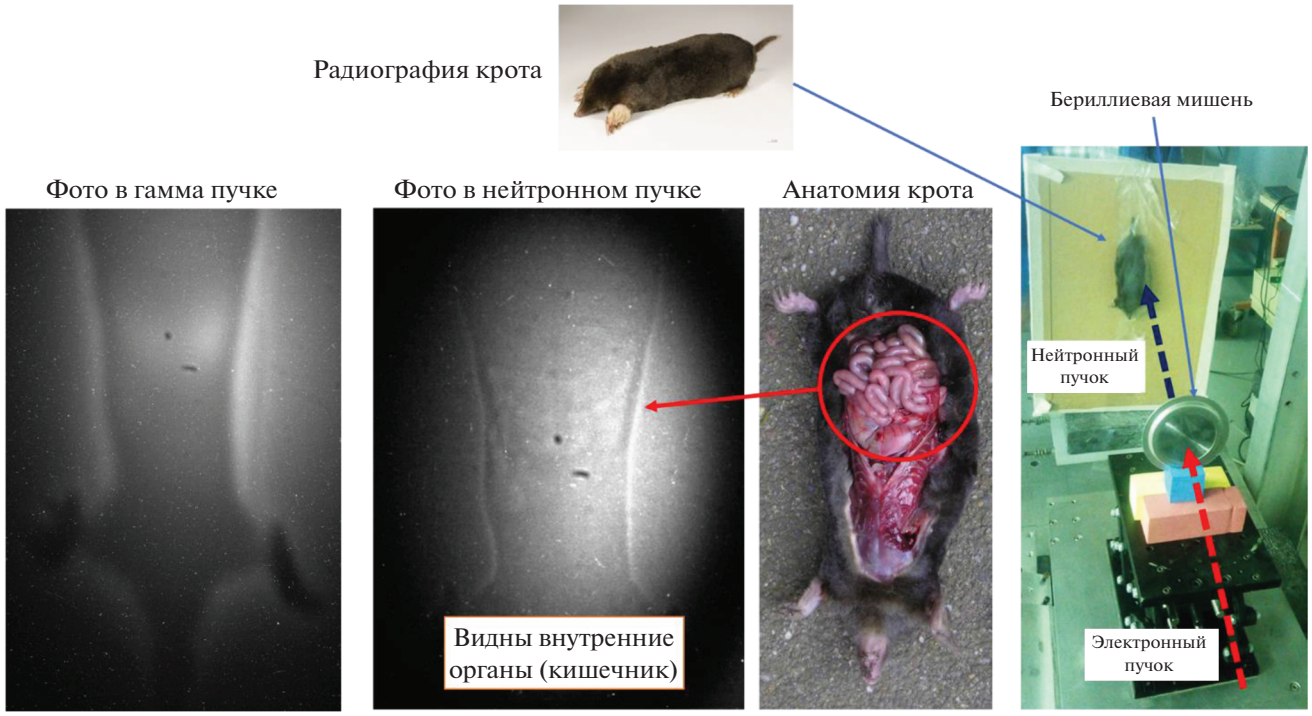

Рис. 11. Радиография биологического объекта в нейтронном и гамма-излучении.

визуализировать пространственное распределение изотопов вещества в исследуемом объекте. Из имеющихся в периодической системе элементов наибольшее сечение взаимодействия с тепловыми нейтронами имеет природный Гадолиний благодаря наличию в своем составе изотопов ^{155}Gd, ^{157}Gd. Для эксперимента по нейтронной радиографии нами была использован промышленный плоскопанельный детектор для дефектоскопии VieworksViVIX с чувствительным слоем в виде пленки из Gd_2O_2S.

Схема эксперимента по нейтронографии биологического объекта Talpa europaea (крот европейский) представлена на рис. 11. В нейтронном пучке на изображении просматриваются контуры внутренних органов животного: печени, кишечника. Для сравнения аналогичные изображения были получены в гамма пучке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате первого эксперимента на ускорителе ЛИНАК-200 при взаимодействии электронного пучка с метаматериалами типа фотонного кристалла получены первые данные, показывающие, что упорядоченные структуры обладают перспективными уникальными свойствами. При взаимодействии релятивистского электронного пучка спектры оптического, радиочастотного и нейтронного излучений зависят как от морфологии кристаллов, так и от их состава и размеров составляющих их элементарных глобул. Это позволяет изменять параметры генерируемого излучения без применения ондуляторных схем и параметров пучка, а изменяя структуру и свойства кристалла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Baldin A. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2021. V. 18. P. 338.
2. *Yamaguti S. et al.* // Phys. Rev. B. 2002. V. 66 (19). P. 195202.
3. *Fally M. et al.* // Opt. Express. 2021. V. 29 (11). P. 16153.
4. *Shevchenko M.A. et al.* // Sci. Rep. 2021. V. 11 (1). P. 7682.
5. *Бечер Ю. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11 (5). С. 1029.
6. *Almohamed Y. et al.* // JETP Lett. 2015. V. 101. P. 365. https://doi.org/10.1134/S0021364015060028
7. *Карпов М.А. и др.* // Материалы Международной конференции “XX Харитоновские чтения”. 2018. Т. 2. С. 189.
8. *Карпов М. А. и др.* // Квантовая электроника. 2022. Т. 52 (6). С. 580.
9. *Anderson Ian S., McGreevy R.L., Hassina Z.* Bilheux. Neutron Imaging and Applications. 2009. New York: Springer.
10. *Dinesh K. Aswal, Partha S. Sarkar, Yogesh S. Kashyap.* Neutron Imaging: Basics, Techniques and Applications. 2022. New York: Springer.

Application of Photonic Crystals for the Generation of Broadband Radiation at the LINAC-200 Linear Accelerator

A. A. Baldin[1, 2], V. V. Kobets[1], V. V. Bleko[1, 2], N. V. Chernega[3], S. F. Umanskaya[3], M. A. Shevchenko[3], T. V. Mironova[3], A. D. Kudryavtseva[3], M. A. Karpov[3, *], M. V. Tareeva[4], N. A. Kleopova[5], Yu. B. Bazarov[6], and A. A. Khristenko[6]

[1]Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia

[2]Institute for Advanced Studies "Omega" LLC, Dubna, Moscow oblast, 141986 Russia

[3]Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

[4]MIREA—Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

[5]Diamond Vision LLC, Moscow, 109235 Russia

[6]Russian Federal Nuclear Center—All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhniy Novgorod oblast, 607188 Russia

**e-mail: maksim.karpov@gmail.com*

Received June 30, 2023; revised June 30, 2023; accepted July 17, 2023

Abstract—The possibilities of using ordered three-dimensional matrices of photonic crystals for generating gigahertz, optical and neutron radiation when a beam of high-energy electrons interacts with them are considered. The optical spectra of the emission of photonic crystals when a beam of relativistic electrons interacts with them are shown. Experiments were carried out to obtain two-dimensional images of objects in gamma and neutron fluxes during the interaction of an electron beam with a photonic crystal material. The work examines various neutron-generating targets, for which the corresponding neutron yields were calculated. The characteristics of electromagnetic and neutron fields obtained as a result of the experiment are also presented in the article.

Keywords: electron beam, photonic crystal, emission spectrum