

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

DOI: 10.25586/RNU.V9187.20.05.P.004

УДК 537.9

А.Ф. Белянин, А.С. Багдасарян, С.А. Багдасарян, Е.Р. Павлюкова

ГЕНЕРАЦИЯ НАПРАВЛЕННОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СЛОИСТЫХ СТРУКТУРАХ ОПАЛОВЫХ МАТРИЦ И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ*

Проведено экспериментальное моделирование процессов и устройств генерации направленного рентгеновского излучения с использованием слоистых структур материалов на основе опаловых матриц, представляющих правильную упаковку шаровых наночастиц аморфного SiO_2 . Представлены результаты измерения характеристик рентгеновского излучения, индуцированного импульсным лазерным воздействием на образцы на основе опаловых матриц в форме пластин и пленок. Применение слоистых структур из опаловых матриц и пьезоэлектрических материалов позволило генерировать направленное рентгеновское излучение. В экспериментах по анализу расходимости пучка рентгеновского излучения использовали пластины опаловых матриц, размещенные между пластинами из LiNbO_3 или BaTiO_3 , а также пленки опаловых матриц толщиной до 20 слоев на подложках. Состав и строение опаловых матриц и нанокмозитов на их основе, а также условия проведения экспериментов (измерения проводились в температурном диапазоне 300... 100 К) оказывали влияние на характеристики рентгеновского излучения. Показана возможность генерации импульсного рентгеновского излучения с угловой расходимостью $\approx 1 \cdot 10^{-3}$ рад.

Ключевые слова: опаловые матрицы, слоистые структуры, лазерное воздействие, рентгеновское излучение.

A.F. Belyanin, A.S. Bagdasaryan, S.A. Bagdasaryan, E.R. Pavlyukova

GENERATION OF DIRECTED X-RAY RADIATION IN LAYERED STRUCTURES OF OPAL MATRIXES AND PIEZOELECTRIC MATERIALS

Experimental modeling of the processes and devices for generation of directed X-ray radiation using layered structures of the materials based on opal matrixes, represented by the correct packing of spherical amorphous SiO_2 nanoparticles, has been carried out. The results of the measurements for the characteristics of X-ray radiation induced by pulsed laser impact on samples based on opal matrixes in the form of plates and films are presented. The application of layered structures of opal matrixes and piezoelectric materials made it possible to generate directed X-ray radiation. In the experiments to analyze the divergence of the X-ray beam, we used opal matrix plates placed between LiNbO_3 or BaTiO_3 plates, as well as the opal matrix films with the thickness up to 20 layers on substrates. The composition and structure of opal matrixes and nanocomposites based on them, as well as the experimental conditions (measurements were carried out in the temperature range 300... 100 K) influenced on the characteristics of X-ray radiation. The possibility for generation of the pulsed X-ray radiation with an angular divergence of $\approx 1.10^{-3}$ rad is shown.

Keywords: opal matrixes, layered structures, laser impact, X-rays.

* Работа поддержана РФФИ (гранты 18-07-00282 А и 18-29-02076 МК).

Введение

Фотонные кристаллы благодаря наличию в них запрещенных фотонных зон и областей аномального возрастания плотности фотонных состояний представляют интерес с точки зрения управления характеристиками лазерного излучения и получения новых эффективных источников электромагнитных волн. Для практических применений перспективны фотонные кристаллы на основе опаловых матриц – искусственного материала, представляющего собой правильную упаковку одинаковых по диаметру шаровых наночастиц аморфного SiO_2 [1–4]. Материалы на основе опаловых матриц относятся к новому классу некристаллических нанокомпозитов, а именно к метаматериалам (фотонно-фононным кристаллам) – материалам с запрещенными фотонными и фононными зонами. Большой интерес вызывает применение опаловых матриц для генерации рентгеновского излучения (электромагнитное излучение в спектральной области между УФ- и гамма-излучением в пределах длин волн $10^2 \dots 10^{-3}$ нм, или энергией фотонов от 10 эВ до нескольких МэВ) при лазерном воздействии, что может быть использовано при разработке и изготовлении различных устройств для медицины, рентгенографии и дефектоскопии материалов [5–7]. В результате взаимодействия импульсного лазерного излучения (наносекундного диапазона длительности) с опаловой матрицей (трехмерной фотонно-фононной средой) генерировалось акустическое (в диапазоне 5... 15 ГГц) и импульсное рентгеновское излучение [5, 6].

Генерация рентгеновского излучения при использовании опаловых матриц происходит без создания вакуума или плазмы, что делает процесс простым в применении. Решение проблемы повышения технических и технологических характеристик источников рентгеновского излучения за счет создания принципиально новых конструкций может привести к разработке сверхминиатюрных источников рентгеновского излучения.

Целью настоящей работы являлось изучение направленного рентгеновского излучения, индуцированного импульсным лазерным возбуждением материалов на основе опаловых матриц.

Методика эксперимента

Образцы опаловых матриц синтезировали гидролизом смеси (суспензии) тетраэфира ортокремниевой кислоты ($\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$) с этанолом ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) в присутствии гидроксида аммония (NH_4OH) по ранее разработанной методике [8–10]. Сформированные образцы объемом до 10 см^3 подвергались сушке и термообработке в сушильном шкафу при 420 К в течение суток и в муфельной печи при 970 К в течение 10 ч, после чего упрочнялись при температуре $\approx 1400 \text{ К}$ и давлении 0,2 МПа. Для получения объемного материала с заданными диаметрами шаровых частиц SiO_2 в диапазоне 200... 400 нм изменяли концентрацию $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$. В ряде случаев применяли опаловые матрицы, межшаровые пустоты которых были заполнены деионизованной водой (нанокомпозит $\text{OM}:\text{H}_2\text{O}$, где OM – опаловая матрица) или жидким азотом. В пустотах ряда образцов опаловых матриц синтезировали Ni (нанокомпозит $\text{OM}:\text{Ni}$) путем 5-кратного заполнения пустот водным раствором нитрата никеля ($\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$) и нагревом образцов до $\approx 670 \dots 720 \text{ К}$ (выдержка 1 ч), а также отжигом при 1200 К (4 ч) в H_2 .

Для исследования генерации рентгеновского излучения из объемных образцов опаловых матриц вырезали пластины размером $5 \times 5 \times (1 \dots 3)$ мм. Механически полирован-

ные пластины опаловых матриц закрепляли между пластинами ($5 \times 5 \times (1...2)$ мм), изготовленными из монокристаллических пьезоэлектрических материалов, обладающих высокой пьезоэлектрической эффективностью (коэффициент электромеханической связи $k^2 > 0,2\%$). В качестве монокристаллов пьезоэлектрических материалов использовали ниобат лития (LiNbO_3) или титанат бария (BaTiO_3), выращенных методом Чохральского. Пьезоэлектрические материалы контактировали с опаловой матрицей, плоскостями $\{0001\}$ (композиционные структуры $\text{LiNbO}_3/\text{OM}/\text{LiNbO}_3$, $\text{BaTiO}_3/\text{OM}/\text{BaTiO}_3$). Пластины скреплялись с использованием жидкости (силиконовая смазка, глицерин и др.) с температурой замерзания < 200 К или механического зажима. Контактные поверхности материалов обрабатывали фтористоводородной кислотой (HF) с последующей отмывкой водой и $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$.

Помимо композиционных в экспериментах использовали слоистые структуры, изготовленные осаждением пленок опаловых матриц (толщиной до 20 слоев шаровых частиц SiO_2) на подложках из монокристаллических пьезоэлектриков: SiO_2 -кварц и LiNbO_3 (структуры SiO_2 -кварц/ОМ и LiNbO_3 /ОМ). Перед наращиванием пленок опаловых матриц подложки обрабатывались HF.

Состав и строение опаловых матриц и нанокомпозитов на их основе исследовали с использованием растрового электронного микроскопа Carl Zeiss Supra 40-30-87 и атомно-силового микроскопа Digital Instruments, Nanoscope 3.

Для определения лучевой прочности материалов на основе опаловых матриц и генерации ими рентгеновского излучения при воздействии лазерного излучения использовали импульсный рубиновый лазер с плотностью мощности $0,25 \dots 10,0$ ГВт/см² (длина волны 694,3 нм; длительность импульса 20 нс; максимальная энергия 0,5 Дж). Лазерное излучение фокусировали оптической системой. При измерении длины волны рентгеновского излучения применяли различные источники лазерного излучения в ИК- и УФ-областях [6]. Рентгеновское излучение, возникающее при воздействии лазерного излучения на опаловые матрицы, регистрировали рентгеновской пленкой и гамма-спектрометром UniSpec 503. Измерения проводились в температурном диапазоне $300 \dots 100$ К (температура жидкого азота).

Результаты и их обсуждение

Строение образцов. Были изготовлены серии образцов опаловых матриц диаметром (d) шаровых частиц SiO_2 $200 \dots 350$ нм (Δd для каждой серии $< 4\%$) (рис. 1).

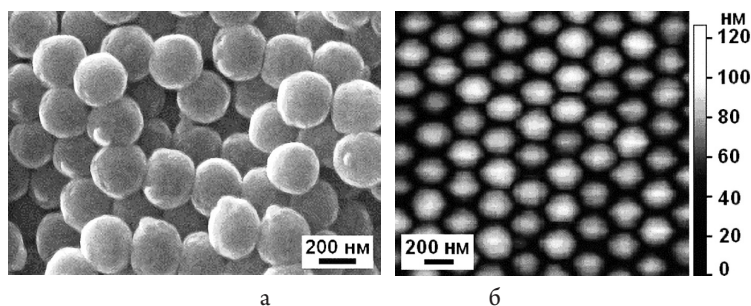


Рис. 1. Строение опаловых матриц: *а* – растровая электронная микроскопия поверхности скола объемного образца; *б* – атомно-силовая микроскопия поверхности роста

Упрочненные образцы опаловых матриц имели в области соприкосновения шаровых частиц контактные площадки в форме круга диаметром до $0,3d$. Качество пленок опаловых матриц толщиной до 20 слоев (рис. 2) на подложках различных материалов зависело от дисперсности используемых для осаждения суспензий (отклонения в диаметрах шаровых частиц в суспензиях не должно превышать 5 %) и подбора специальных режимов испарения, сушки и отжига.

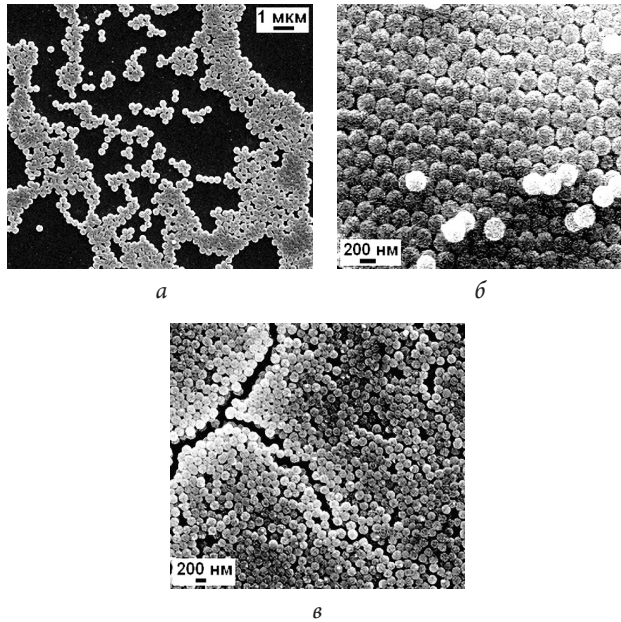


Рис. 2. Растровая электронная микроскопия упорядоченных упаковок шаровых частиц SiO_2 , сформированных на подложках из кварца: *a* – начальная стадия формирования первого слоя; *б, в* – поверхность пленки, состоящей из 10 (*б*) и 20 (*в*) слоев шаровых частиц

Упаковка шаровых частиц SiO_2 образует решетку, имеющую тетраэдрические и октаэдрические пустоты, которые условно состоят из сфер, вписанных в пустоты, и соединяющего их пространства. Каждую шаровую частицу SiO_2 диаметром d окружает по 6 октаэдрических (диаметр вписываемой в межшаровую пустоту сферы $\approx 0,41d$) и 8 тетраэдрических ($\approx 0,22d$) пустот. Упорядоченная система сообщающихся пустот занимает $\approx 26\%$ объема опаловых матриц. Максимальный размер свободного пространства на стыке тетраэдрических и октаэдрических пустот составляет $\approx 0,39d$.

Воздействие на опаловые структуры лазерного излучения. Образцы опаловых матриц, состоящие из шаровых наночастиц SiO_2 с $d \approx 250$ нм, при воздействии одного импульса лазерного излучения показали лучевую прочность 550 ГВт/см², в то время как у опаловых матриц с $d \approx 300$ нм лучевая прочность составляла 350 ГВт/см². Лучевая прочность образцов опаловых матриц и нанокомпозитов на их основе в зависимости от их состава и строения менялась в пределах $100 \dots 600$ ГВт/см², что на порядок больше по сравнению с кристаллическим или плавленым кварцем. В фотонно-фононных материалах, к которым относятся опаловые матрицы, преобразуется энергия мощного оптического воздействия лазерными импульсами в акустические колебания с неразрушающими материал амплитудами.

Были измерены энергетические спектры рентгеновского излучения, возникающего при воздействии на опаловые матрицы импульсного лазерного возбуждения. На основании спектральных данных сделан вывод, что индуцированное рентгеновское излучение является малоинтенсивным мягким рентгеновским излучением с энергией квантов $0,08 \dots 2,47$ кэВ и с длиной волн $15,2 \dots 0,5$ нм [6, 7].

Условия получения и строение опаловых матриц (толщина, высокотемпературный отжиг, заполнение межшаровых пустот), а также условия проведения экспериментов (получение рентгеновского излучения на просвет или под углом 90° , охлаждение опаловых матриц) оказывают влияние на измеряемые характеристики.

На рисунке 3 представлена схема устройства для генерации направленного импульсно-го рентгеновского излучения при лазерном воздействии [5]. На схеме показан один из вариантов размещения рентгеновской пленки или гамма спектрометра 7 для регистрации рентгеновского излучения б.

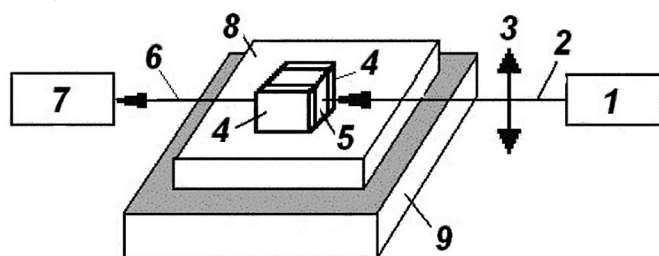


Рис. 3. Схема устройства для генерации и регистрации направленного импульсного рентгеновского излучения: 1 – источник лазерного излучения; 2 – лазерный луч; 3 – оптическая система фокусирования лазерного излучения; 4 – пластины из пьезоэлектрического материала; 5 – пластина опаловой матрицы; 6 – рентгеновское излучение; 7 – система регистрации рентгеновского излучения (кассета с рентгеновской пленкой или гамма спектрометр); 8 – медная пластина; 9 – теплоотводящая емкость с жидким азотом

Устройство включает в себя рубиновый лазер, работающий в режиме модуляции добротности I . Лазерное излучение 2 с использованием линз 3 фокусировалось на композиционную структуру 4, 5, состоящую из пластины опаловой матрицы 5, скрепленной с пластинами пьезоэлектрических материалов 4. Лазерный луч направляли параллельно поверхностям контакта пластин. Композиционная структура установлена на массивной пластине из меди 8, обеспечивающей отвод тепла. Медная пластина 8 с закрепленной композиционной структурой в некоторых экспериментах размещалась в кювету с жидким азотом 9. Рентгеновская пленка закреплялась на расстоянии $5 \dots 20$ см от опаловой матрицы.

Место воздействия при единичном импульсе рентгеновского излучения на пленку представляло собой небольшую по диаметру яркую точку с характерным пространственным распределением. Изменение интенсивности лазерного излучения не приводило к изменению размера пятна. Удаление кассеты с рентгеновской пленкой от исследуемого образца на расстояние до $50 \dots 200$ мм не приводило к существенному изменению размера и относительной интенсивности регистрируемого сигнала, что свидетельствовало о небольшом телесном угле излучения для одиночного импульса. Вид областей затемнения рентгеновской пленки при генерации рентгеновского излучения опаловой матрицей и композиционной структурой приведены на рисунке 4. Без использования пластин на основе пьезоэлектрических материалов происходила генерация рентгеновского излу-

Белянин А.Ф. и др. Генерация направленного рентгеновского излучения...

чения, направление распространения которого не воспроизводилось, и фиксировалось большое расхождение пучка. Использование композиционной структуры значительно уменьшало разброс единичных импульсов рентгеновского излучения, так что имела место направленность генерируемого рентгеновского излучения.

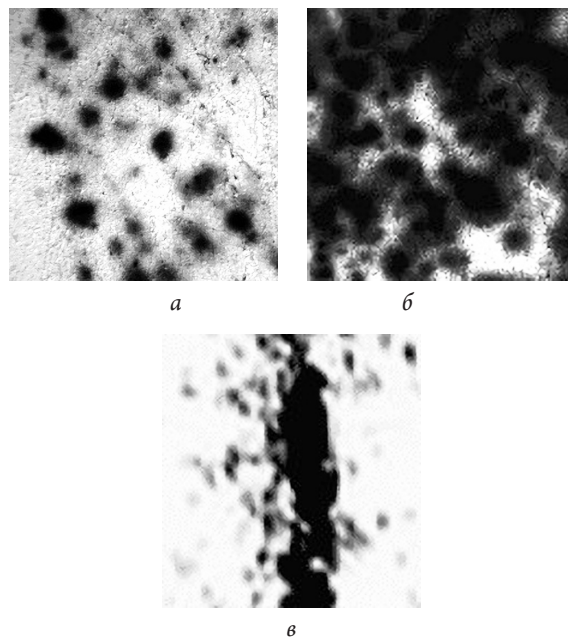


Рис. 4. Снимки воздействия рентгеновского излучения на рентгеновскую пленку (расстояние от исследуемого образца до пленки 15 см) при лазерном облучении: *a, б* – образцы опаловой матрицы (*a* – 2 повтора сеанса лазерного излучения; *б* – 32 повтора сеанса лазерного излучения); *в* – композиционные структуры из пластин пьезоэлектрических материалов и опаловой матрицы (длительное воздействие импульсным рентгеновским излучением с расходимостью $\approx 1 \cdot 10^{-3}$ рад)

В результате воздействия импульсного лазерного излучения (наносекундного диапазона длительности) на опаловую матрицу, представляющую трехмерную фотонно-фононную среду, генерировалось акустическое излучение в диапазоне 5... 15 ГГц и импульсное рентгеновское излучение. При интенсивностях лазерного излучения, превышающих порог возникновения акустических колебаний и сопровождающего их свечения образца, на рентгеновской пленке регистрировалось рентгеновское излучение в виде отдельной засветки.

Состав опаловых матриц и нанокомпозитов на их основе влиял на результат взаимодействия с ними лазерного излучения. Значения угловой расходимости рентгеновского излучения нанокомпозитов ОМ:Ni при 100 К и мощности лазерного излучения 9,9 ГВт/см² составляло $\approx 1 \cdot 10^{-3}$ рад. Размер кристаллитов Ni в нанокомпозите ОМ:Ni составлял 20... 43 нм, при заполнении пустот ≈ 20 %. Генерация рентгеновского излучения с малой угловой расходимостью происходила при воздействии импульсным лазерным излучением мощностью в пределах 0,25... 10 ГВт/см² на пластины опаловых матриц, чьи межшаровые пустоты заполнены различными веществами. Заполняя структурные нанопустоты опаловых матриц жидкостями с различными показателями преломления и ис-

пользуя матрицы с различными размерами шаровых частиц, можно эффективно управлять функциональными характеристиками рентгеновского излучения.

На рентгеновских пленках, полученных при лазерном облучении пленок опаловой матрицы на подложках, присутствовала сплошная полоса почернения в отличие от точечной при экспериментах с пластинами опаловых матриц. Наблюдаемую картину можно объяснить аксиальной текстурированностью доменов в слоях опаловых матриц. Интенсивность рентгеновского излучения от слоистых структур SiO_2 -кварц/ОМ и LiNbO_3 /ОМ зависела от ориентирования подложки из пьезоэлектрического материала и толщины пленки опаловой матрицы. Слоистые структуры, в которых подложкой служили пьезоэлектрические материалы (SiO_2 -кварц/ОМ и LiNbO_3 /ОМ), вызывали повышенную интенсивность рентгеновского излучения по сравнению со структурами Si/ОМ или плавленый кварц/ОМ.

Расходимость рентгеновского излучения зависела от материала пьезоэлектрика и температуры измерения и при использовании пластин из LiNbO_3 (структуры LiNbO_3 /ОМ/ LiNbO_3) составляла $< 1 \cdot 10^{-3}$ рад. Лучшие результаты получены при механическом креплении пластин опаловой матрицы и LiNbO_3 . При использовании пластин из BaTiO_3 независимо от метода их крепления к пластине опаловой матрицы (силиконовая смазка, глицерин, механический прижим) и температуры образца (100...300 К) расходимость рентгеновского излучения составляла $\approx 1 \cdot 10^{-1}$ рад. При использовании пластин из пьезокварца (структура кварц- SiO_2 /ОМ/кварц- SiO_2) с небольшим коэффициентом электро-механической связи ($k^2 \approx 0,05 \dots 0,1\%$) расходимость рентгеновского излучения при тех же условиях составляла $\approx 1,5$ рад.

Генерация рентгеновского излучения с малой угловой расходимостью ($\approx 1 \cdot 10^{-3}$ рад) происходила при воздействии импульсным лазерным излучением мощностью в пределах 0,25...10 ГВт/см² на образцы опаловых матриц, чьи пустоты заполнены различными веществами. Значение угловой расходимости рентгеновского излучения нанокмозитов ОМ:Ni при температуре 100 К и мощности лазерного излучения 9,9 ГВт/см² составляло $\approx 1 \cdot 10^{-3}$ рад.

Высокая эффективность преобразования мощных лазерных импульсов одного вида энергии (оптического излучения) в длительную диссипацию с возникновением других видов колебаний в некристаллических дисперсных структурах создает возможность для применения оптических сред на основе опаловых матриц.

Заключение

Исследованы нелинейно-оптические эффекты, возникающие в опаловых матрицах при импульсном лазерном возбуждении. Опаловые матрицы применяли для генерации акустических волн и рентгеновского излучения при лазерном воздействии. Представлены результаты измерения характеристик рентгеновского излучения, индуцированного импульсным лазерным воздействием на образцы на основе опаловых матриц в форме пластин и пленок. Определены условия применения опаловых матриц и нанокмозитов на их основе в качестве эффективного источника рентгеновского излучения при импульсном лазерном возбуждении. Использование композиционных структур из опаловых матриц и пьезоэлектрических материалов позволило создавать направленное рентгеновское излучение.

Белянин А.Ф. и др. Генерация направленного рентгеновского излучения...

Уменьшение разброса импульсов генерируемого рентгеновского излучения достигалось за счет изготовления образца опаловой матрицы в виде пластины, контактирующей с пластинами из пьезоэлектрических материалов, вырезанных из монокристаллов пьезоэлектриков с $k^2 > 0,2\%$, что позволяло создать выделенное направление для акустических волн, имеющих фотон-фононное взаимодействие с рентгеновским излучением. Расходимость рентгеновского излучения зависела от материала пьезоэлектрика и температуры измерения, и при использовании пластин из LiNbO_3 и BaTiO_3 (структуры $\text{LiNbO}_3/\text{OM}/\text{LiNbO}_3$ и $\text{BaTiO}_3/\text{OM}/\text{BaTiO}_3$) составляла порядка 10^{-3} рад.

Исследованные материалы перспективны для решения большого числа практических задач, например, в медицине при эндоскопических исследованиях. Размещение опаловых матриц на выходе оптического волокна с лазерным излучением делает возможным доставку рентгеновского излучения непосредственно к облучаемому объекту. При подключении волоконно-оптической системы к спектрометру комбинационного рассеяния света можно наблюдать и контролировать эффективность рентгеновского воздействия на заданный объект.

Публикуется с разрешения «Журнала радиоэлектроники»

Библиографические ссылки

1. Tuyen L.D., Wu C.Y., Anh T.K., Minh L.Q., Kan H-C., Hsu C.C. Fabrication and optical characterization of SiO₂ opal and SU-8 inverse opal photonic crystals. *Journal of experimental nanoscience*, 2012, vol. 7, no. 2, pp. 198–204.
2. Nishijima Y., Ueno K., Juodkazis S., Mizeikis V., Misawa H., Tanimura T., Maeda K. Inverse silica opal photonic crystals for optical sensing applications. *Optics express*, 2007, vol. 15, no. 20, pp. 12979–12988.
3. Armstrong E., O'Dwyer C. Artificial opal photonic crystals and inverse opal structures – fundamentals and applications from optics to energy storage. *Journal of materials chemistry C*, 2015, vol. 3, pp. 6109–6143.
4. Miguez H., Blanco A., Lopez C., Meseguer F., Yates H.M., Pemble M.E., Lopez-Tejiera F., Garcia-Vidal F.J., Sanchez-Dehesa J. Face centered cubic photonic bandgap materials based on opal-semiconductor composites. *Journal of lightwave technology*, 1999, vol. 17, no. 11, pp. 1975–1981.
5. Генерация электромагнитного и акустического излучений в наноструктурированных системах / Н.В. Чернега, Самойлович М.И., А.Ф. Белянин, А.Д. Кудрявцева, С.М. Клещева // *Нано- и микросистемная техника*. 2011. № 4. С. 21–31.
6. Рентгеновское излучение при лазерном воздействии на опаловые матрицы / А.Ф. Белянин, А.С. Багдасарян, С.А. Багдасарян, В.В. Борисов, Е.Р. Павлюкова // *Журнал радиоэлектроники*. 2019. № 6. С. 15.
7. Tcherniega N.V., Kudryavtseva A.D., Kuznetsova M.V., Shevchenko M.A., Baranov A.N., Belyanin A.F., Borisov V.V., Karpov M.A., Rozinskii D.V. Directed UV and X-ray generation in nanomaterials at the optical excitation. *Journal of Physics: Conference Series, Irreversible Processes in Nature and Technics*, 2019, p. 012054.
8. Строение, диэлектрические и магнитные свойства нанокомпозитов на основе опаловых матриц, фосфатов и ванадатов металлов / А.Ф. Белянин, А.С. Багдасарян, Ю.В. Гуляев, А.И. Юрин, Е.Р. Павлюкова // *Журнал радиоэлектроники*. 2019. № 5. С. 4.

9. Изучение строения биосовместимых наноматериалов на основе диоксида кремния / А.Ф. Белянин, А.С. Багдасарян, Н.С. Сергеева, С.А. Багдасарян, Е.Р. Павлюкова // Журнал радиоэлектроники. 2020. № 4. С. 6.

10. *Gulyaev Y.V., Bagdasaryan A.S., Belyanin A.F., Bagdasaryan S. A. and Pavlyukova E.R.* Nanocomposites Based on Opal Matrixes and Magnetic Materials for Medical Electronics: 2020 XXXIIIrd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science. Rome, Italy, 2020, pp. 1-2. doi: 10.23919/URSIGASS49373.2020.9232252.

References

1. *Tuyen L.D., Wu C.Y., Anh T.K., Minh L.Q., Kan H-C., Hsu C.C.* Fabrication and optical characterization of SiO₂ opal and SU-8 inverse opal photonic crystals. Journal of experimental nanoscience, 2012, vol. 7, no. 2, pp. 198–204.

2. *Nishijima Y., Ueno K., Juodkazis S., Mizeikis V., Misawa H., Tanimura T., Maeda K.* Inverse silica opal photonic crystals for optical sensing applications. Optics express, 2007, vol. 15, no. 20, pp. 12979–12988.

3. *Armstrong E., O'Dwyer C.* Artificial opal photonic crystals and inverse opal structures – fundamentals and applications from optics to energy storage. Journal of materials chemistry C, 2015, vol. 3, pp. 6109–6143.

4. *Miguez H., Blanco A., Lopez C., Meseguer F., Yates H.M., Pemble M.E., Lopez-Tejiera F., Garcia-Vidal F.J., Sanchez-Dehesa J.* Face centered cubic photonic bandgap materials based on opal-semiconductor composites. Journal of lightwave technology, 1999, vol. 17, no. 11, pp. 1975–1981.

5. *Chernega N.V., Samoilovich M.I., Belyanin A.F., Kudryavtseva A.D., Klescheva S.M.* [Generation of electromagnetic and acoustic radiation in nanostructured systems]. Nano- i mikrosistemnaya tekhnika, 2011, no. 4, pp. 21–31 (in Russ.).

6. *Belyanin A.F., Baghdasaryan A.S., Bagdasaryan S.A., Borisov V.V., Pavlyukova E.R.* [Roentgen radiation during laser action on opal matrices]. Zhurnal radioelektroniki, 2019, no. 6, pp. 15 (in Russ.).

7. *Tcherniega N.V., Kudryavtseva A.D., Kuznetsova M.V., Shevchenko M.A., Baranov A.N., Belyanin A.F., Borisov V.V., Karpov M.A., Rozinskii D.V.* Directed UV and X-ray generation in nanomaterials at the optical excitation. Journal of Physics: Conference Series, Irreversible Processes in Nature and Technics, 2019, p. 012054.

8. *Belyanin A.F., Baghdasaryan A.S., Gulyaev Yu.V., Yurin A.I., Pavlyukova E.R.* [Structure, dielectric and magnetic properties of nanocomposites based on opal matrices, phosphates and vanadates of metals]. Zhurnal radioelektroniki, 2019, no. 5, pp. 4 (in Russ.).

9. *Belyanin A.F., Baghdasaryan A.S., Sergeeva N.S., Baghdasaryan S.A., Pavlyukova E.R.* [Study of the structure of biocompatible nanomaterials based on silicon dioxide]. Zhurnal radioelektroniki, 2020, no. 4, pp. 6 (in Russ.).

10. *Gulyaev Y.V., Bagdasaryan A.S., Belyanin A.F., Bagdasaryan S.A. and Pavlyukova E.R.* Nanocomposites Based on Opal Matrixes and Magnetic Materials for Medical Electronics: 2020 XXXIIIrd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science. Rome, Italy, 2020, pp. 1-2. doi: 10.23919/URSIGASS49373.2020.9232252.