

УДК 538.9

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ГЕНЕРАЦИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ С ВЕЩЕСТВОМ НА УСТАНОВКЕ “РЕНТГЕН 1”

© 2017 г. В. И. Алексеев<sup>1,2</sup>, В. А. Астапенко<sup>3</sup>, А. Н. Елисеев<sup>1,2</sup>, Э. Ф. Иррибарра<sup>4</sup>, В. А. Карпов<sup>2</sup>, И. А. Кищин<sup>1,2</sup>, Ю. А. Кротов<sup>5</sup>, А. С. Кубанкин<sup>1,2, \*</sup>, Р. М. Нажмудинов<sup>1,2</sup>, М. Аль-Омари<sup>1</sup>, С. В. Сахно<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 308007 Белгород, Россия

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н. Лебедева Российская академия наук, 119991 Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт, 117303 Москва, Россия

<sup>4</sup>Национальная политехническая школа, E11-253 Кито, Эквадор

<sup>5</sup>Научно-исследовательский институт “Полус” им. М.Ф. Стельмаха, 117342 Москва, Россия

\*E-mail: kubankin@bsu.edu.ru

Поступила в редакцию 29.09.2016 г.

Приведено описание установки “Рентген 1”, предназначенной для исследований спектрально-угловых характеристик рентгеновского излучения, генерируемого при взаимодействии пучка электронов с энергией 7 МэВ с веществом, в том числе с поверхностями различной формы. Установка отличается низким радиационным фоном, что позволяет измерять спектры излучения низкой интенсивности. Представлены результаты измерений характеристик поляризационного тормозного излучения релятивистских электронов из сред с различной атомной структурой.

**Ключевые слова:** параметрическое рентгеновское излучение, поликристаллы, релятивистские электроны, поляризационное тормозное излучение.

**DOI:** 10.7868/S0207352817070034

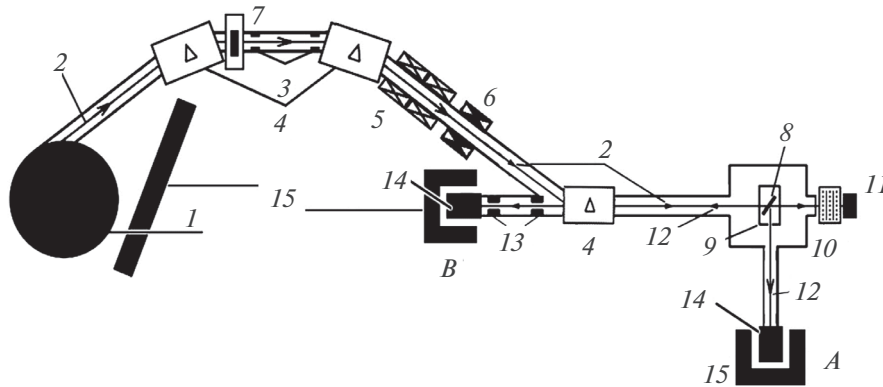
### ВВЕДЕНИЕ

Механизмы взаимодействия заряженных частиц с веществом и внешними электромагнитными полями широко используются для генерации пучков электромагнитного излучения, которые применяются в медицине, биологии, физике твердого тела и других областях. Разработка новых направлений использования пучков заряженных частиц всегда была актуальной задачей. Одной из основных проблем в данной области является крайне малое число экспериментальных установок, на которых возможно проведение исследований, что связано со сложностью эксплуатации ускорителей и необходимостью использования дорогостоящего оборудования. Одной из таких установок является установка “Рентген 1”, разработанная в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН.

Эта установка создана на базе синхротрона С-25Р “Пахра” в Лаборатории ускорительных устройств Отдела физики высоких энергий Физического института им. П.Н. Лебедева РАН [1] для исследований свойств поляризационного тормозного излучения (ПТИ) [2] в средах с частично-упорядоченной атомной структурой [3]. В

качестве источника электронов использовался микротрон с энергией 7 МэВ, являющийся инжектором синхротрона [4]. ПТИ генерируется вследствие поляризации атомов среды под влиянием кулоновского поля ускоренной частицы, которая движется в среде. При упорядоченном расположении атомов в ПТИ преобладает когерентная составляющая, характеристики которой связаны с параметрами атомной структуры [3]. Такая особенность позволяет определять параметры атомной структуры по измеренному спектру когерентного ПТИ [5, 6]. Когерентное ПТИ в кристаллах более известно как параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ) [7, 8]. Важно отметить, что в первых работах [3, 9] ПРИ в поликристаллах называли поляризационным тормозным излучением.

Основной проблемой при изучении ПРИ из сред с частично-упорядоченной атомной структурой являлась малая интенсивность регистрируемого сигнала [3, 9]. В связи с этим “Рентген 1” изначально проектировали как низкофоновую установку, позволяющую эффективно регистрировать спектр полезного сигнала на уровне порядка единиц фотонов в минуту при наличии в



**Рис. 1.** Экспериментальная установка: 1 – микротрон; 2 – электронный пучок; 3 – коллиматоры электронного пучка; 4 – поворотные магниты; 5 – квадрупольные магнитные линзы; 6 – корректор; 7 – вакуумный затвор; 8 – мишень; 9 – гониометр; 10 – пропорциональная камера; 11 – цилиндр Фарадея; 12 – измеряемое излучение; 13 – коллиматоры; 14 – детектор; 15 – свинцовая радиационная защита; A и B – типы геометрии.

спектре интенсивных квазимонохроматических линий характеристического рентгеновского излучения (ХРИ), которое также генерируется при взаимодействии пучка электронов с мишенью.

В процессе исследований начиная с 2003 г. установку “Рентген 1” модернизировали несколько раз, в результате чего в настоящее время она является во многом универсальной, позволяющей проводить исследования в широком спектральном диапазоне и в произвольной геометрии наблюдения процесса излучения.

В настоящей работе представлено описание основных технических характеристик установки “Рентген 1”.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В качестве источника релятивистских электронов используется микротрон-инжектор синхротрона “Пахра”, позволяющий получить пучок ускоренных электронов с энергией 7 МэВ. Микротрон генерирует структурированный во времени пучок электронов с частотой следования импульсов 50 Гц при длительности импульса до 4 мкс. Внутренняя структура каждого импульса определяется “малыми” импульсами (банчами) длительностью около 1 см с периодичностью 10 см [4]. Установка “Рентген 1” схематически представлена на рис. 1. При ее проектировании особое внимание уделялось уровню радиационного фона в предполагаемой области расположения детектора.

Основным назначением используемого в качестве источника релятивистских электронов микротрона является инжекция электронов, ускоренных до энергии 7 МэВ, в канал синхротрона для дальнейшего ускорения. Для вывода пучка электронов из канала инжекции первоначально был установ-

лен поворотный магнит, отклоняющий пучок электронов в отдельный вакуумный канал.

Выполненные расчеты выхода процессов генерации рентгеновского излучения в рамках характеристик пучка электронов показали необходимость уменьшения тока пучка и его угловой расходимости. Для решения данной задачи в канале после первого поворотного магнита были установлены два цилиндрических графитовых коллиматора с апертурой 3 мм и длиной 50 мм на расстоянии около 1.5 м друг от друга. Установленные коллиматоры снизили интенсивность пучка на три–четыре порядка, но стали источником интенсивного фона. Фон преимущественно создавали тормозное и характеристическое рентгеновские излучения. По отношению к оси пучка электронов интенсивный радиационный фон распространялся в конусе с углом раствора около  $30^\circ$ . Выбор графита в качестве материала коллиматоров для предотвращения накопления заряда в их объеме объясняется относительно низким выходом тормозного излучения (тормозное излучение преимущественно распространяется в конусе с углом раствора порядка  $\gamma^{-1}$  относительно траектории излучающих электронов, а выход пропорционален  $Z^2$ , где  $\gamma$  – фактор Лоренца излучающего электрона,  $Z$  – атомный номер элемента материала мишени) и хорошими проводящими свойствами.

Интенсивный радиационный фон также генерировался и в микротроне, преимущественно распространяясь в плоскости орбит. Для уменьшения влияния фона на систему регистрации исследуемого сигнала в канале был установлен второй поворотный магнит, обеспечивающий отклонение пучка на заданный угол, который был выбран для вывода пучка с минимальным фоном в область экспериментального зала.

При неизменной интенсивности пучка электронов поворотные магниты значительно его деформировали, вследствие чего возникла проблема коррекции формы пучка. Для решения данной задачи за вторым поворотным магнитом была установлена система фокусировки и коррекции пучка, включающая две пары квадрупольных магнитных линз для фокусировки и корректор положения пучка в сечении канала в вертикальном направлении. Исследования формы пучка на разных этапах создания установки проводили с помощью пропорциональных проточных камер с рабочей областью  $32 \times 32$  мм и точностью определения координаты пучка в поперечном сечении канала  $\pm 1$  мм. Интенсивность определяли цилиндром Фарадея [4].

Расстояния между основными деталями установки: магнит № 1—магнит № 2 — 0.24 м; магнит № 2—магнит № 3 — 2 м; магнит № 3—мишень — 0.8 м; мишень—пропорциональная камера — 0.6 м; расстояние между коллиматорами пучка электронов 1.5 м.

Эксперимент происходит следующим образом (рис. 1). Микротрон 1 генерирует пучок электронов 2 с энергией 7 МэВ. Первым поворотным магнитом 4 (по ходу пучка электронов) пучок выводится из канала инжекции и далее формируется двумя углеродными коллиматорами 3 с апертурой 3 мм. В процессе взаимодействия пучка с коллиматорами возникает интенсивный радиационный фон, преимущественно распространяющийся вдоль оси коллиматоров. Второй поворотный магнит 4 выводит пучок из области радиационного фона в магнитооптический канал формирования пучка, состоящий из двух пар квадрупольных магнитных линз 5 и корректора 6. Третий поворотный магнит 4 выводит пучок электронов в мишенную вакуумную камеру, в которой располагается мишень 8. Ориентацию мишени контролирует гониометр 9, также имеется возможность вывода мишени из пучка электронов. Диагностику пространственного положения пучка и его интенсивности осуществляют с помощью пропорциональной камеры 10 и цилиндра Фарадея 11. Излучение 12, генерирующееся в процессе взаимодействия электронов 2 с мишенью 8, формируется коллиматорами 13, установленными перед детектором 14. Микротрон и детектор закрыты свинцовой защитой 15 для снижения уровня радиационного фона. Вакуум в микротроне и мишенной камере общий, при необходимости разделяется шиберным затвором 7.

Установка до модернизации позволяла проводить измерения в геометрии двух основных типов, обозначенных А и В. Геометрия В является уникальной и соответствует случаю, когда излучение регистрируется в направлении, противоположном направлению распространения пучка электронов, взаимодействующих с мишенью.

Для исследований спектрально-угловых характеристик рентгеновского излучения, генерируемого при взаимодействии релятивистских электронов с веществом, была спроектирована универсальная вакуумная камера, позволяющая измерять эти характеристики в широких диапазонах углов наблюдения. В камере предусмотрены вакуумные порты с майларовыми окнами толщиной 100 мкм для вывода пучка электронов к пропорциональной камере и цилиндру Фарадея.

Камера позволяет наблюдать процесс взаимодействия пучка электронов с мишенью в диапазоне углов  $1^\circ$ – $10^\circ$ ,  $30^\circ$ – $150^\circ$  и  $170^\circ$ – $180^\circ$  относительно направления распространения излучающих электронов в горизонтальной плоскости. Положение и ориентация мишени контролируется посредством вакуумного гониометра с четырьмя степенями свободы: три степени свободы вращения в ортогональных плоскостях с точностью  $0.01^\circ$  в диапазоне  $0^\circ$ – $360^\circ$  (пошаговый режим, имеется возможность управления в режиме дробления шага  $1/2$ ,  $1/4$  и  $1/8$  шага); линейное перемещение мишени в горизонтальной плоскости перпендикулярно пучку электронов с точностью 12 мкм в диапазоне 0–100 мм.

Измеренные характеристики пучка электронов в месте расположения мишени следующие: поперечный размер пучка не более 3 мм (ширина на полувысоте при аппроксимации плотности тока пучка распределением Гаусса); угловая расходимость не более 5 мрад.

Для создания высокого вакуума в камере была установлена система откачки на основе турбомолекулярного высоковакуумного насоса в комбинации с безмасляным форвакуумным насосом, что позволяет достигать вакуума порядка  $10^{-6}$  торр.

В рамках характеристик микротрона минимально возможная величина скважности была 5000 при длительности импульса сброса 4 мкс. Данное обстоятельство означало, что детектор должен быть достаточно быстродействующим и иметь максимальную загрузку не менее  $10^4$  событий в секунду, что, ориентировочно, позволило бы при каждом импульсе сброса регистрировать один фотон. Расчеты выходов ПРИ из сред с частично-упорядоченной атомной структурой и результаты предварительных экспериментов показали, что спектр возникающего излучения можно представить в виде плавной “подложки” тормозного излучения и фона, на которой “располагаются” пики ХРИ и ПРИ, вклад ПРИ составляет величину 0.1–1% от суммарного регистрируемого сигнала.

Достаточно низкий выход ПРИ делал предпочтительным измерение сигнала детектором со скоростью счета не менее  $10^5$  событий в секунду в спектральной области исследований, энергетическое разрешение детектора должно быть как мож-

но выше для выделения спектральных линий ПРИ на плавной подложке фона. Дополнительная загрузка детектора осуществлялась за счет интенсивного радиационного фона микротрона, который создавали электромагнитные наводки, рентгеновское излучение и зарядовая компонента. Величина фоновой загрузки определяется преимущественно объемом регистрирующего излучение элемента детектора, в котором энергия излучения преобразуется в электрический сигнал, поэтому предпочтительным является использование детекторов с малым объемом рабочего элемента.

Учитывая изложенные выше требования к детекторам, следует отметить, что оптимальным вариантом является использование полупроводниковых детекторов, которые имеют типичные показатели загрузки порядка  $10^5$  имп./с, энергетическое разрешение 100–200 эВ в области 1–10 кэВ и объемом рабочего элемента  $\sim 1$  мм<sup>3</sup>. Еще одной ценностью данного типа детекторов является близкая к 100% эффективность регистрации фотонов в области 1–10 кэВ. Таким образом, в качестве основы блока спектрометрии были выбраны рентгеновские полупроводниковые детекторы серий XR-100CR и XR-100SDD [10].

Основными преимуществами используемых детекторов являлись высокая скорость регистрации и термоэлектрическое охлаждение кристалла детектора, что позволило проводить измерения при интенсивном радиационном фоне и высокой скважности электронного пучка. Отсутствие необходимости подвода жидкого азота для охлаждения кристалла позволило поместить детектор в малый объем и экранировать его свинцом.

К недостаткам детекторов можно отнести наличие аппаратных фантомных сигналов (вклад данных эффектов  $\sim 0.1\%$ ), проявляющихся во время измерений. Особенно заметны данные эффекты при измерении интенсивных пиков на плавной подложке, например, ХРИ на подложке тормозного излучения. В данном случае в измеренном спектре будут присутствовать фантомные ESC-пики (пики вылета), энергия которых будет равна разности значений энергии измеряемых пиков и края фотопоглощения кремния (регистрирующий излучение кристалл детектора сделан из кремния). Механизм образования ESC-пиков объясняется неупругим рассеянием измеряемого излучения на кристалле.

Сигналы детекторов обрабатывали при помощи спектрометрической электроники, включающей первичный дискриминатор, усилитель-формирователь, аналогово-цифровой преобразователь и многоканальный амплитудный анализатор импульсов. Все основные установки детекторов контролировали посредством программы набора и обработки статистики, что позволило значи-

тельно варьировать режимы работы детекторов при измерениях в различных условиях. Наиболее ценной является возможность изменения времени формирования импульса, что позволяет проводить измерения при нагрузках до  $10^6$  фотонов/с.

Для уменьшения фона детекторы были дополнительно защищены свинцом. Во всех экспериментах измеряемый сигнал жестко коллимировался, что дополнительно позволило уменьшить регистрируемый фон от внутренней поверхности канала спектрометрии и мишенной камеры.

Для подавления фона, генерируемого на внутренней поверхности мишенной камеры и держателе мишени, детали камеры в зоне регистрации сигнала детектором были экранированы оргстеклом и майларом. Уменьшение фона вследствие экранировки объясняется элементным составом экранирующих материалов — С, О и Н. Во-первых, в этих веществах генерация тормозного излучения происходит менее интенсивно, чем в нержавеющей стали, из которой в основном сделана мишенная камера. Во-вторых, ХРИ атомов майлара и оргстекла сосредоточено в области до 1 кэВ и не способствует дополнительной загрузке детектора, в то время как ХРИ деталей камеры находится в диапазоне 1–10 кэВ, где сосредоточен измеряемый сигнал. Экранировка позволила избавиться от фоновых пиков ХРИ в измеряемых спектрах.

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Как было отмечено, установку “Рентген 1” разрабатывали для измерений спектрально-угловых характеристик ПРИ из сред с частично-упорядоченной атомной структурой. Первые измерения на установке были выполнены в рамках исследования ПРИ из поликристаллических фольг Al, Cu и Ni [5]. В рамках экспериментов были зафиксированы спектральные пики ПРИ под углом наблюдения  $90^\circ$  и измерен абсолютный выход ПРИ. Сравнение результатов измерений с теорией [3] показало хорошее количественное согласие. На следующем этапе было измерено ПРИ под углом  $75^\circ$ , в результате было зафиксировано смещение спектральных пиков согласно предсказаниям теории [11]. Полученные результаты показывают возможность идентифицировать когерентные пики ПРИ по их положению в спектре, так как при изменении угла наблюдения пики ПРИ изменяют свое положение, в то время как положение пиков ХРИ остается неизменным.

Более тонким экспериментом, выполненным на установке “Рентген 1”, стало измерение ПРИ из поликристаллов и кристаллов в геометрии обратного рассеяния. Наиболее важными результатами стали: регистрация аномального сужения спектральных пиков ПРИ [12], предсказанного в

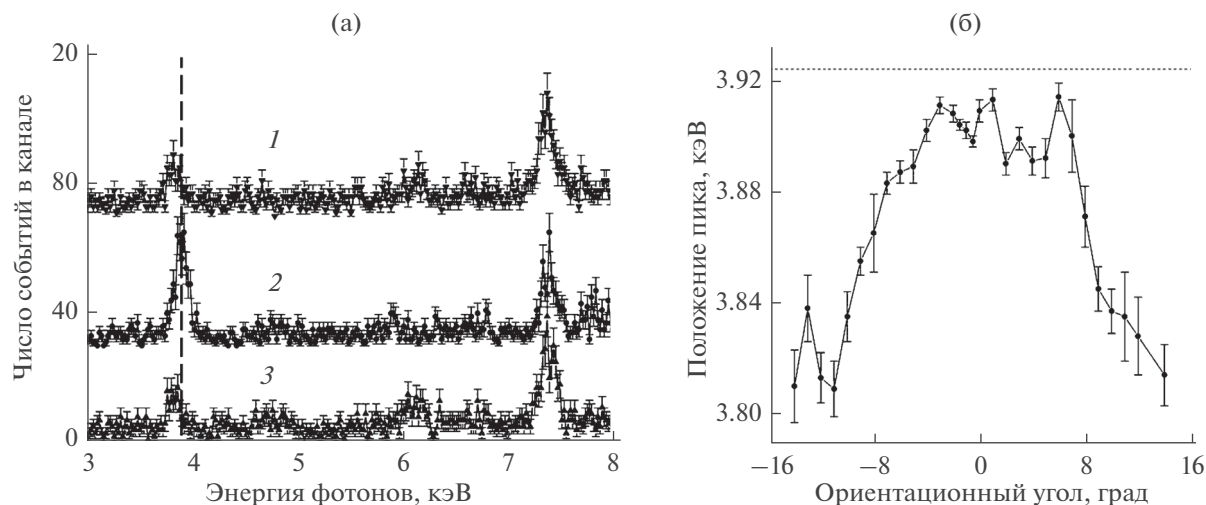


Рис. 2. Спектры ПРИ из текстурированного поликристалла вольфрама при ориентационных углах  $-10^\circ$  (1),  $0^\circ$  (2) и  $10^\circ$  (3) (а). Зависимость положения пика ПРИ 200 от ориентационного угла (б).

[13], и наблюдение ПРИ в области аномальной дифракции [14]. Выполненные измерения отличаются малым фоном и высоким энергетическим разрешением. На рис. 2 представлены спектры, измеренные из текстурированного поликристалла вольфрама. Плоскость поверхности мишени совпадала с кристаллографической плоскостью (200). Распределение зерен мишени по углам ориентации аппроксимировали функцией Гаусса. Ширина на полувысоте (“величина” текстуры) была равна  $5.44^\circ$ . В спектральной области, расположенной с левой стороны от вертикальной линии, дифракция рентгеновского излучения невозможна, в то время как дифракция виртуальных фотонов реализоваться может. Из рисунка видно, что при углах ориентации мишени  $-10^\circ$  и  $10^\circ$  относительно пучка электронов пики смещаются в запрещенную для дифракции рентгеновского излучения область, что характеризует зарегистрированные пики как пики ПРИ. При всех значениях

ориентационных углов пики ПРИ проявляются в области ниже энергии Вульфа–Брэгга на величину  $0.11$  кэВ (3%).

Стоит также отметить измерение характеристик ПРИ из кристалла кремния на установке “Рентген 1” в геометрии асимметричной дифракции [15]. Был зафиксирован эффект увеличения выхода ПРИ при скользящем взаимодействии релятивистских электронов с кристаллами [16].

Подобный высокий уровень измерений позволяет качественно сравнить теорию и эксперимент. В [14] представлены результаты сравнения ориентационных зависимостей выхода ПРИ из текстурированного поликристалла вольфрама и высокоориентированного пироэлектрического графита. Можно отметить хорошее согласие теории и эксперимента.

Также на установке “Рентген 1” были предприняты попытки измерения ПРИ из поликристаллов с субмикронным размером зерен. На рис. 3 представлен измеренный спектр ПРИ из поликристаллической фольги никеля со средним размером зерен  $300$  нм [17, 18].

Важными особенностями выполненных экспериментов стали измеренные спектральная ширина, положения и амплитуды пиков ПРИ, что стало подтверждением высоких функциональных характеристик установки “Рентген 1”.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установка “Рентген 1” является многофункциональной низкофоновой установкой, предназначенной для исследования механизмов рентгеновского излучения, реализующихся при взаимодействии релятивистских электронов с веществом. Данная особенность позволила исследовать ПРИ

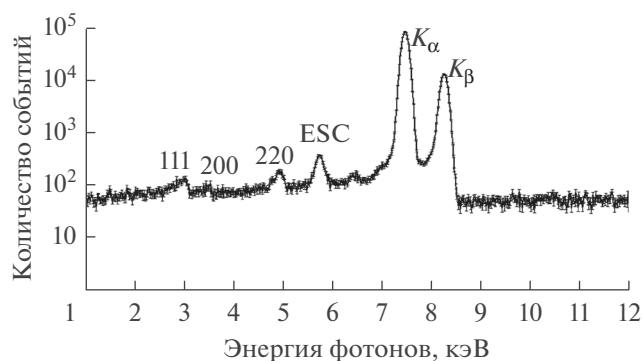


Рис. 3. Спектр ПРИ из поликристаллической фольги никеля со средним размером зерен  $300$  нм [17, 18].

из вещества с различной степенью упорядоченности атомной структуры, начиная от поликристаллов со случайной ориентацией зерен и заканчивая кристаллами с атомной структурой высокого качества. Также было измерено ПРИ из поликристаллов с субмикронным размером зерен, что стало возможным благодаря низкому фону установки.

В настоящее время установка “Рентген 1” модифицируется для измерения спектров излучения в областях вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена (100–1000 эВ), а также в области жесткого рентгеновского излучения (10–100 кэВ). Данная особенность позволяет выполнить запланированные эксперименты по исследованию ПТИ в наноструктурированных и аморфных средах, а также по наблюдению дифрагированного излучения Вавилова–Черенкова в слоистых средах.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-32-00502 мол\_а) и в рамках проектной части государственного задания № 3.2009.2014/К.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Субботин Г.Г., Серов А.В. Квазиаккумулятивный режим работы синхротрона “Пахра”. Препринт ФИАН. 2007. № 19. 18 с.
2. Амосья М.Я., Буймистров В.М., Зон Б.А., Цытович В.Н. и др. Поляризованное тормозное излучение частиц и атомов. М.: Наука, 1987. 334 с.
3. Nasonov N. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B. 1998. V. 145. P. 19.
4. Алексеев В.И., Карпов В.А., Ким А.А. и др. Система диагностики выведенного электронного пучка на уско-рителе “Пахра”. Препринт ФИАН. 2000. № 13. 12 с.
5. Астапенко В.А., Кубанкин А.С., Насонов Н.Н. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2006. Т. 84. Вып. 6. С. 341.
6. Astapenko V., Khablo V., Kubankin A. et al. // Proceed. SPIE. 2007. V. 6634. P. 663407.
7. Тер-Микаелян М.Л. Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях. Ереван: Изд-во АН Арм. ССР, 1963. 460 с.
8. Потылицын А.П. Излучение электронов в периодических структурах. Томск: Изд-во НТЛ, 2008. 280 с.
9. Blazhevich S., Cherpurnov A., Grishin V. et al. // Phys. Lett. A. 1999. V. 254. P. 230.
10. URL: <http://www.amptek.com/>.
11. Гостищев Н.А., Кубанкин А.С., Насонов Н.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 17. С. 78.
12. Алексеев В.И., Вохмянина К.А., Елисеев А.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. № 6. С. 83.
13. Astapenko V., Nasonov N., Zhukova P. // J. Phys. B. 2007. V. 40. P. 1337.
14. Alexeyev V.I., Eliseyev A.N., Irribarra E. et al. // Phys. Lett. A. 2016. V. 380. P. 2892.
15. Елисеев А.Н., Кубанкин А.С., Назмудинов Р.М. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90. Вып. 6. С. 482.
16. Lobko A.S., Nasonov N., Zhukova P. et al. // Proceed. SPIE. 2007. V. 6634. P. 663417.
17. Алексеев В.И., Иррибарра Э.Ф., Кубанкин А.С. и др. // Поверхность. Рентген, синхротр. и нейтрон. ис-след. 2013. № 3. С. 88.
18. Alekseev V.I., Eliseev A.N., Irribarra E.F. et al. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B. 2015. V. 342. P. 47.

## Study of Mechanisms of X-Ray Generation during Interaction between Relativistic Electrons and Medium Using the Facility “Röntgen 1”

V. I. Alexeyev V. A. Astapenko, A. N. Eliseyev, E. F. Irribarra, V. A. Karpov, I. A. Kishchin, Yu. A. Krotov, A. S. Kubankin, R. M. Nazhmudinov, M. Al-Omari, S. V. Sakhno

The description of the experimental facility “Röntgen 1” developed for measurements of spectral-angular distributions of X-ray generated during the interaction between 7 MeV electron beam and medium including beam interaction with different surfaces is presented. The facility has low radiation background and allows measuring the radiation spectra of low intensity. Results of polarization bremsstrahlung from targets with different atomic structures are presented.

**Keywords:** parametric X-Ray radiation, polycrystalline, relativistic electrons, polarization bremsstrahlung.