УДК 621.384.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ КОГЕРЕНТНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 500–850 МэВ ЭЛЕКТРОНАМИ В СЛОЖНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ РАДИАТОРАХ

В.Н. Забаев, В.В. Каплин, С.И. Кузнецов, С.Р. Углов

Томский политехнический университет
E-mail: vnz@tpu.ru

Приведен анализ результатов серии экспериментов, выполненных ранее на электронном синхротроне, по исследованию механизмов генерации когерентного рентгеновского излучения 500–850 МэВ электронами в сложных периодических многокристальных радиаторах и радиаторах типа многослойных интерференционных рентгеновских зеркал. Анализ показал, что такой подход позволяет получить более интенсивное и узконаправленное излучение, чем при использовании монокристаллов, за счет вклада дифрагированного рентгеновского переходного излучения.

Ключевые слова:
Ультрарелятивистские электроны, сложные периодические радиаторы, кристаллы, рентгеновские зеркала, переходное излучение, параметрическое излучение.

Забаев Виктор Николаевич, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Физико-технического института ТПУ. E-mail: vnz@tpu.ru
Область научных интересов: эффекты электромагнитного излучения заряженных частиц, физика когерентных и ориентационных эффектов, ускорительная физика.

Каплин Валерий Викторович, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Физико-технического института ТПУ. E-mail: kaplin@tpu.ru
Область научных интересов: эффекты электромагнитного излучения заряженных частиц, физика когерентных и ориентационных эффектов, ускорительная физика.

Кузнецов Сергей Иванович, канд. техн. наук, доцент кафедры общей физики Физико-технического института ТПУ. E-mail: smit@tpu.ru
Область научных интересов: сильноточная СВЧ-электроника, астрофизика, эффекты электромагнитного излучения заряженных частиц, физика когерентных и ориентационных эффектов, ускорительная физика.

Углов Сергей Романович, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Физико-технического института ТПУ. E-mail: uglov@tpu.ru
Область научных интересов: эффекты электромагнитного излучения заряженных частиц, физика когерентных и ориентационных эффектов, ускорительная физика.

Введение

В комплексе экспериментальных работ [1–3] была развита новая методика генерации когерентного рентгеновского излучения, испускаемого под большими углами к пучку ультрарелятивистских электронов, проходящих сложный радиатор, состоящий из периодической слоистой структуры и кристалла, установленного под углом Брэгга относительно пучка электронов. Механизм излучения здесь определяется процессами дифракции на кристалле рентгеновского переходного излучения (РПИ), генерированного электронами на слоях структуры, и генерацией параметрического рентгеновского излучения (ПРИ) электронами в этом кристалле. При этом фотоны дифрагированного РПИ (ДРПИ) и ПРИ испускаются в направлении Брэгга под большими углами к пучку электронов вне конуса тормозного излучения. Суммарная интенсивность излучения (ДРПИ+ПРИ) из сложного радиатора примерно на порядок превышает интенсивность «чистого» ПРИ из кристалла. Дальнейшим развитием идеи использования ДРПИ для эффективной генерации когерентного рентгеновского излучения, испускаемого под большими углами к пучку электронов для уменьшения некогерентного фона, является предложение в качестве новых радиаторов многокристальной периодической структуры и многослойной структуры типа интерференционного рентгеновского зеркала.

В настоящей статье представлены результаты экспериментальных исследований генерации когерентного рентгеновского излучения в таких новых источниках, которые были проведены на томском синхротроне в 1997–2001 гг. при использовании внутреннего пучка электронов с энергией 500–850 МэВ. Целью экспериментов было: исследование деталей формирования эмиссии фотонов из многослойной кристаллической структуры [4, 5]; использование оригинального многокристального радиатора, созданного на поверхности монокристаллической пластины методом микролитографии [6, 7]; обнаружение генерации когерентного рентгеновского излучения в многослойных интерференционных структурах [8], известных в оптике как рентгеновские зеркала.

Экспериментальная установка

Общая схема установки, которая использовалась для экспериментов с новыми источниками излучения, приведена на рис. 1, *а*. Пучок ускоренных электронов томского синхротрона с энергией 500 или 850 МэВ сбрасывался на внутренний радиатор того или иного типа. Длительность импульса сброса электронов на мишень составляла 10 мс, частота повторений – 5 Гц. Тормозное излучение (ТИ), генерированное в радиаторе, регистрировалось гаусс-квантометром (*Q*), показания которого использовались для нормирования результатов измерений. Когерентное излучение (ПРИ+ДРПИ), испускаемое из радиаторов под углом 18–20° к направлению пучка электронов, выходило через бериллиевое окно камеры синхротрона толщиной 200 мкм и попадало в детектор (*D*).

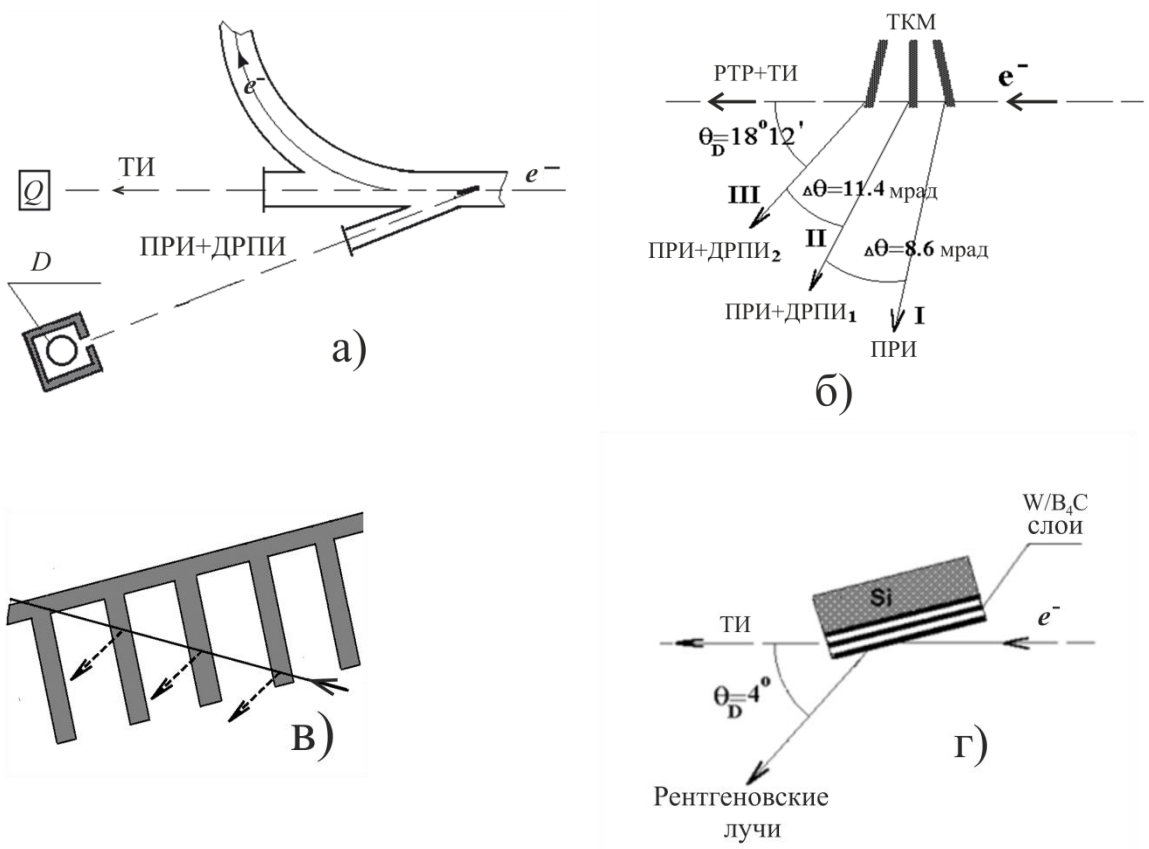

Рис. 1. *а* – общая схема экспериментов: *Q* – квантометр, *D* – детектор; *б* – геометрия генерации излучения в трехкристальной мишени (ТКМ): I, II, III – направления рефлексов излучения из первого, второго и третьего кристаллов соответственно; *в* – многокристальный радиатор на поверхности кристаллической пластины; *г* – радиатор из многослойного рентгеновского зеркала

Трехкристальный радиатор

Исследования генерации излучения в многокристальных радиаторах проводились в коллаборации с Hiroshima University и Toshiba Corporation (Japan) на томском [4] и токийском [5] синхротронах. Многокристальные радиаторы были изготовлены Toshiba Corporation в виде стопок из нескольких Si-кристаллов, расположенных на некотором расстоянии и ориентированных относительно друг друга. Кристаллические пластинки вырезались так, чтобы кристаллографические плоскости (220) были перпендикулярны к их поверхностям. Но тестовый эксперимент, проведенный на томском синхротроне с использованием 10-кристального радиатора, показал, что главным недостатком такой конструкции радиатора является неточность взаимной ориентации кристаллов, которая приводит к разбросу направлений излучения, генерированного в отдельных кристаллах.

Исследование на рентгеновском пучке другого радиатора, состоящего из трех кристаллов кремния толщиной 16 мкм, разделенных промежутками 147 мкм, показал, что крайние кристаллы, составляющие радиатор, разориентированы относительно среднего на 4,3 и 5,7 мрад в разные стороны. С этим радиатором был поставлен эксперимент по наблюдению формирования генерации излучения в каждом кристалле отдельно [4]. При пропускании через такой радиатор узкого пучка электронов под некоторым углом к плоскостям (220) в геометрии Лауэ можно получить три хорошо разделенных рефлекса рентгеновского излучения в брэгговских направлениях (рис. 1, *б*), отличающихся на удвоенное значение угла взаимной разориентации кристаллов. Первый рефлекс излучения (I), испускаемый из первого кристалла, формируется за счет ПРИ и вклада дифракции переходного излучения, рожденного на входной поверхности первого кристалла (здесь данный вклад будет мал). Второй рефлекс излучения (II) – за счет ПРИ из второго кристалла и дифракции на нем переходного излучения, рожденного на поверхностях первого кристалла. Третий рефлекс (III), соответственно, образован ПРИ из третьего кристалла и дифракции на нем РПИ от предыдущих двух кристаллов. Измерив характеристики рефлексов, можно судить о процессе формирования когерентного рентгеновского излучения релятивистских электронов, пролетающих через сложную кристаллическую структуру.

В этом эксперименте в качестве детектора использовался сцинтилляционный спектрометр с толщиной NaJ(Tl) кристалла 2 мм. Энергетическое разрешение составляло около 35 % для ^{57}Co (линия 6,4 кэВ) и 16 % для ^{241}Am (59,6 кэВ). Порог регистрации был установлен на уровне 7 кэВ. Входное бериллиевое окно детектора имеет диаметр 40 мм и толщину 200 мкм. Перед детектором располагался вертикальный щелевой коллиматор шириной 2 мм. Расстояние между мишенью и детектором составляло 458 см, включая 243 см воздуха. Для измерения «чистого» ПРИ без вклада ДРПИ использовалась также однокристальная мишень эквивалентной толщины (48 мкм Si-кристалл). Оба радиатора были закреплены на одной гониометрической головке, перемещая которую вертикально, можно было располагать их на пучке электронов поочередно.

В экспериментальном спектре ПРИ, полученном на эквивалентной мишени в брэгговской ориентации, присутствуют спектральные пики первого (около 18 кэВ) и второго (около 36 кэВ) порядков. Отношение выходов фотонов ПРИ в интервалы энергий 29–44 и 10–29 кэВ, включающие второй и первый спектральный пики, составляет 0,13. На эквивалентной мишени были также измерены ориентационные зависимости (ОЗ) выхода фотонов ПРИ в указанных энергетических интервалах от угла падения (θ) пучка электронов на радиатор.

На рис. 2 приведены экспериментальная (точки) и расчётные ОЗ выхода 10–29 кэВ фотонов, генерированных в трехкристальном радиаторе.

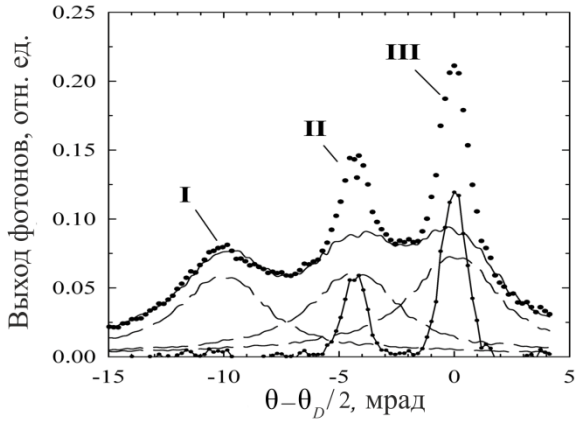

Рис. 2. Жирные точки – измеренный выход рентгеновского излучения, генерированного 850 МэВ электронами в трехкристальной мишени. Штриховые кривые – парциальный выход ПРИ из каждого отдельного кристалла. Сплошная кривая – суммарный выход ПРИ из трех кристаллов. Сплошная кривая с точками (выделяются два пика) – вклады за счет ДРПИ из первого (левый пик) и второго (правый пик) кристаллов

Полученная экспериментальная ОЗ имеет три максимума I, II и III, появляющихся при последовательном прохождении кристаллов, составляющих радиатор, через брэгговские положения их ориентации. Три штриховые кривые показывают три парциальных вклада ПРИ в общую картину, которые были сгенерированы в каждом из кристаллов. Форма этих трех кривых была получена при обработке ОЗ излучения, измеренной на эквивалентной мишени. Сплошная кривая показывает ОЗ выхода ПРИ из трехкристальной мишени как сумму вышеупомянутых парциальных вкладов с учетом фотопоглощения в веществе радиатора и его геометрии. Парциальные вклады ДРПИ (кривая с точками) в общий выход излучения получены вычитанием из экспериментальной ОЗ (жирные точки) суммарной ОЗ ПРИ (сплошная кривая). Рис. 2 показывает, что пики в ОЗ парциальных выходов ДРПИ из отдельных кристаллов существенно уже, чем ОЗ выхода ПРИ. Их ширина составляет 1,25 и 4,75 мрад соответственно. Таким образом, ДРПИ представляет собой более узконаправленный источник рентгеновского излучения, чем ПРИ. Кроме того, из рисунка следует, что выход ДРПИ в максимуме ОЗ увеличивается с номером кристалла так, что угловая плотность ДРПИ из третьего кристалла превышает плотность ПРИ примерно в 1,7 раза.

На рис. 3 приведено сравнение расчета и эксперимента.

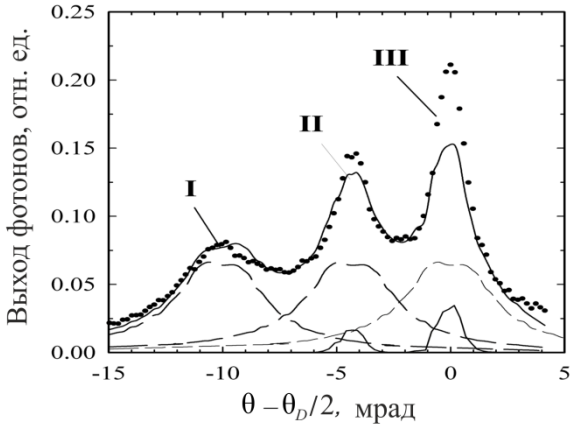

Рис. 3. Сравнение эксперимента и расчета. Жирные точки – измеренный выход рентгеновского излучения, генерированного 850 МэВ электронами в трехкристальной мишени. Штриховые кривые – расчетные ОЗ ПРИ из трех кристаллов. Тонкие кривые, содержащие левый и правый пики, – расчетные ОЗ ДРПИ из второго и третьего кристаллов. Жирная сплошная кривая – расчетная сумма вкладов ПРИ и ДРПИ из всех кристаллов с учетом интерференции

Расчеты выполнены в кинематическом приближении. При этом использовались теоретические модели [9] с учетом экспериментальных условий. Штриховые кривые показывают парциальные выходы ПРИ из трех кристаллов, тонкие сплошные кривые – выходы ДРПИ из второго и третьего кристаллов.

Сравнивая результаты, приведенные на рис. 2 и рис. 3, можно сделать вывод, что расчетное соотношение выходов ДРПИ и ПРИ не соответствует соотношению, полученному в эксперименте, а их сумма не описывает форму экспериментальной ориентационной зависимости. Аномально высокий выход излучения в экспериментальных максимумах II и III (рис. 2) может быть связан с проявлением интерференции ДРПИ и ПРИ. Учет интерференции был проведен в модельном приближении – рассчитывался квадрат суммы амплитуд ПРИ и ДРПИ для всего конуса излучения, а затем учитывалась геометрия детектора. Полученная зависимость, показанная на рис. 3 жирной кривой, гораздо лучше согласуется с экспериментом, хотя различие попрежнему достаточно велико, особенно для пика III. Вероятно, для понимания наблюдаемого эффекта необходимы дополнительные исследования.

Проведенный эксперимент показал, что составление радиатора из ряда кристаллов приводит к эффективному увеличению выхода рентгеновского излучения по сравнению со случаем одного монокристалла с толщиной, эквивалентной общей толщине сборки. При этом за счет ДРПИ угловое распределение излучения существенно уже распределения ПРИ из монокристалла. Анализ соотношения вкладов ПРИ и ДРПИ в формирование ориентационной зависимости излучения из трехкристальной мишени показывает, что результирующее излучение является не просто суммой ПРИ и ДРПИ, а может быть результатом их интерференции.

Многокристальный радиатор на поверхности кристаллической пластины

Далее на томском синхротроне был исследован многокристальный радиатор [6, 7], который не имеет недостатков, присущих радиаторам от Toshiba Corporation, собранным из тонких кристаллических пластинок. Это многокристальный радиатор, созданный в Томске на поверхности GaAs-пластинки методом микролитографии с плазмохимическим травлением, представляющий собой плоскую, периодическую, многокристальную структуру. Кристаллические элементы – стрипы, которые составляют такой радиатор, точно ориентированы относительно друг друга. Кроме того, радиатор компактнее, чем составленный из отдельных кристаллов, и проще в изготовлении. Схема сечения радиатора показана на рис. 1, *в*. Если электроны пересекают систему стрипов под некоторым углом Брэгга $\theta = \theta_B$ к атомным плоскостям структуры, то ПРИ испускается в конус с осью также под углом Брэгга к ним. Фотоны рентгеновского переходного излучения (РПИ), рожденные на поверхностях стрипов, испускаются вблизи направления электронного пучка и дифрагируют также в брэгговском направлении (ДРПИ). Такой радиатор эквивалентен составному многокристальному радиатору с числом кристаллов $N = H/L$ cot θ, где H – высота стрипов, L – период структуры. Чтобы достичь большего числа N, использовалась асимметричная геометрия генерации рентгеновского излучения. Угол между кристаллографическими плоскостями (100) и поверхностью пластины GaAs составлял $\theta_a = 2{,}7^o$. При угле детектирования излучения $\theta_D = 19^o$, угол между поверхностью пластины GaAs и электронным пучком $\theta = \theta_D/2 - \theta_a = 6{,}8^o$. Соответственно, при параметрах радиатора $H = 100$ мкм, $L = 43$ мкм, созданного для этого эксперимента, эффективное число кристаллов радиатора $N = 20$.

Многокристальный радиатор закреплялся в гониометрической головке и мог перемещаться вертикально так, чтобы можно было менять положение пучка электронов на радиаторе и получать излучение из стриповой структуры или из гладкой части кристалла. Фотоны ДРПИ и фотоны ПРИ, испущенные из стрипов, детектировались рентгеновским полупроводниковым CdTe-детектором, расположенным под углом $\theta_D = 19^o$ к направлению пучка электронов и на расстоянии 245 см от радиатора. Энергетическое разрешение детектора составляло около 0,8 кэВ.

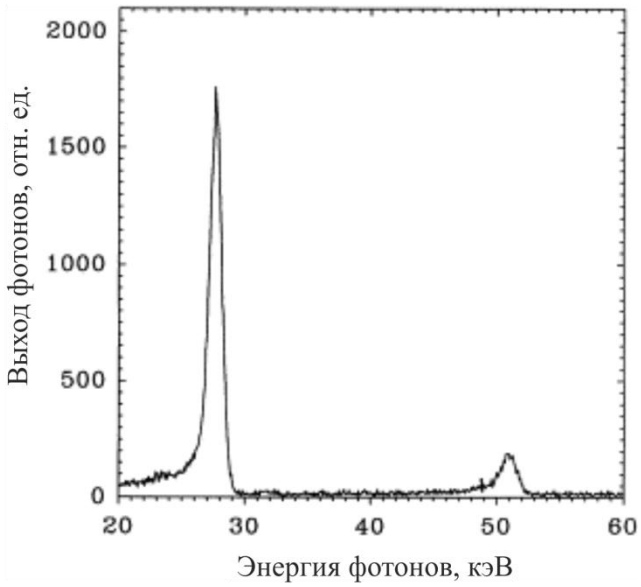

Рис. 4. Спектр излучения, генерированного 500 МэВ электронами в многокристальной периодической структуре, созданной на поверхности GaAs-пластины

Приведенный на рис. 4 спектр излучения из периодической структуры, измеренный при симметричной ориентации радиатора, $\theta = \theta_B = \theta_D/2 = 9{,}5^\circ$, имеет яркий пик при энергии фотонов 27 кэВ и менее яркий пик второго порядка.

Спектр излучения из гладкой части кристаллической пластины также имеет пики при этих энергиях фотонов. Но выход излучения из многокристальной структуры гораздо выше, чем из сплошного кристалла. Увеличение выхода излучения из периодической структуры создается за счет дифрагированного на кристаллографической структуре радиатора рентгеновского переходного излучения ДРПИ. Фотоны РПИ генерируются на боковых поверхностях кристаллических стрипов периодической структуры радиатора и затем дифрагируют на ряде последующих кристаллических стрипов.

Результаты измерений ОЗ выхода излучения из многокристального радиатора приведены на рис. 5. Диапазон энергий регистрируемых фотонов составлял 25–29 кэВ. Кривая *1* представляет измеренную ориентационную зависимость выхода излучения, генерированного в периодической структуре. Чтобы получить эту зависимость, радиатор ориентировался под определенными углами к пучку электронов и определялся выход фотонов в этой области энергий фотонов.

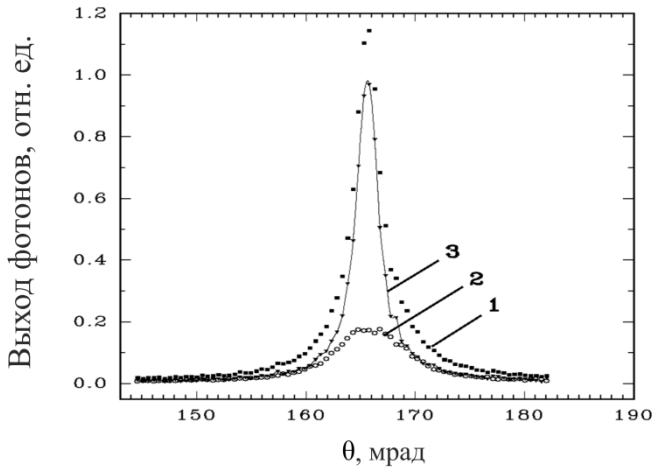

Рис. 5. Кривая *1* – измеренная ориентационная зависимость выхода излучения из периодической части радиатора; кривая *2* – вклад ПРИ; кривая *3* – вклад ДРПИ

Кривая *2* на рис. 5 показывает ориентационную зависимость для ПРИ, генерированного в периодической структуре. Кривая получена из ориентационной зависимости ПРИ, измеренной для сплошной части радиатора и уменьшенной по высоте в k = 2,38 раз. Коэффициент k – это отношение длины пути в сплошной части радиатора к длине пути в кристаллическом веществе периодической структуры. Ориентационная зависимость излучения из многокристальной структуры примерно в 6 раз выше и в 3 раза уже, чем ориентационная зависимость «чистого» ПРИ. Это значит, что конус излучения из многокристальной периодической структуры также в 3 раза уже, чем конус ПРИ из монокристаллической части радиатора. Кривая *3*, полученная вычитанием данных для «чистого» ПРИ из данных для излучения из периодической структуры, показывает ориентационную зависимость ДРПИ с возможным вкладом интерференции ПРИ и ДРПИ. Видно, что механизм ДРПИ примерно в 5 раз эффективнее механизма ПРИ для данной многокристальной структуры и условий эксперимента.

Рентгеновское зеркало как радиатор рентгеновского излучения

Позднее на томском синхротроне был исследован новый источник когерентного рентгеновского излучения – многослойная интерференционная структура, известная в оптике как рентгеновское зеркало [8]. Исследования проводились в коллаборации с Adelphi Technology Inc. (США). Такая структура состоит из сотен чередующихся пар слоев из тяжелого и легкого материалов с периодом их повторения в несколько нанометров. При прохождении релятивистских электронов через такой радиатор возможна генерация как ПРИ, так и ДРПИ. Для обнаружения этого эффекта использовалось рентгеновское зеркало, изготовленное OSMIC Inc., которое имело 300 пар слоев W и B_4C с периодом 1,24 нм. Вертикальный и горизонтальный размеры радиатора составляли 10 и 32 мм соответственно, а толщина Si-подложки – около 100 мкм. Полупроводниковый CdTe-детектор располагался под углом θ_D = 66,3 мрад к направлению пучка электронов и на расстоянии 443 см от радиатора. На рис. 6 приведены ОЗ выхода излучения в диапазонах энергии фотонов 9,24–20,17 кэВ (кривая *1*) и 92–268 кэВ (кривая *2*).

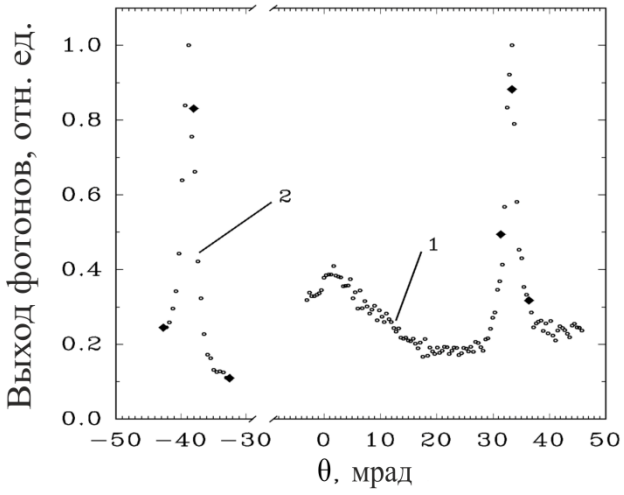

Рис. 6. Ориентационные зависимости выхода излучения в областях энергий фотонов 9,24–20,17 кэВ (кривая *1*) и 92–268 кэВ (кривая *2*)

Кривые *1* и *2* соответствуют областям проявления эффекта генерации когерентного излучения от зеркала и возможного ПРИ от Si-подложки. Обе зависимости демонстрируют яркие максимумы при отличающихся ориентациях радиатора 33,2 и 39 мрад. Первая ориентация соответствует симметричному положению зеркала относительно направления электронного пучка и направления от зеркала к детектору, вторая соответствует симметричному положению (311) плоскостей Si-подложки.

Спектры излучения при ориентациях зеркала 31,1; 33,2 и 36,1 мрад приведены на рис. 7.

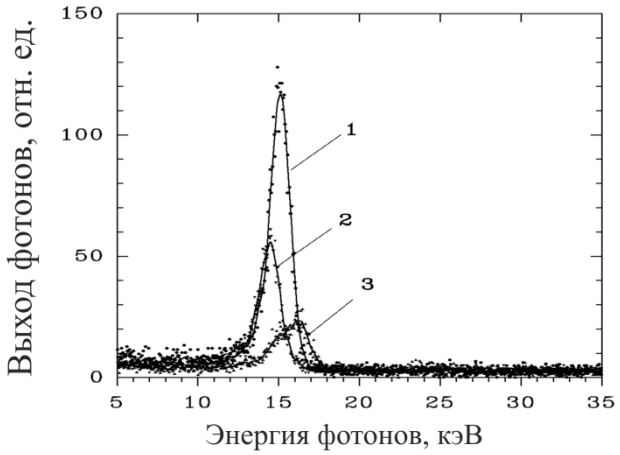

Рис. 7. Спектры излучения из рентгеновского зеркала при ориентациях 33,2; 31,1; 36,1 мрад (кривые *1, 2, 3* соответственно)

Спектральный пик излучения из рентгеновского зеркала меняет свое положение и амплитуду при наклоне радиатора и максимален при симметричной ориентации. Была также измерена зависимость спектра ПРИ от ориентации атомных плоскостей Si-подложки. Спектральный пик ПРИ из подложки также менял свое положение и амплитуду при наклоне радиатора и достигал максимума при энергии фотонов 142 кэВ. Кристаллографические плоскости (113) Si-подложки, отвечающие за это излучение, разориентированы относительно слоев структуры зеркала на угол 71,3 мрад. Учитывая, что путь электронов в слоистой структуре примерно в 300 раз меньше, чем в ее подложке, можно заключить, что эффективность радиатора на основе рентгеновского зеркала гораздо выше, чем эффективность радиатора на основе монокристалла.

Заключение

Описанные выше эксперименты показали, что пучки электронов с энергией в несколько сотен МэВ могут генерировать в многокристальных радиаторах и в радиаторах на основе рентгеновских зеркал квазимонохроматическое, узконаправленное и регулируемое рентгеновское излучение, испускаемое под большими углами к пучку электронов, вне конуса тормозного излучения, что важно при практическом использовании эффекта. Механизм излучения определяется сложением вкладов ПРИ и ДРПИ, причем ДРПИ является доминирующим в общем выходе излучения.

Эксперименты с рентгеновскими зеркалами были продолжены на внутреннем пучке бетатрона Б-35 при энергиях электронов в области 15–33 МэВ [10]. Затем эти исследования были развиты в направлении изучения генерации излучения в трехслойном волноводе [11] и сложном волноводе [12] со слоистыми стенками-радиаторами, которые представляют собой два рентгеновских зеркала, разделенных промежутком, выполняющим роль канала волновода для генерированного излучения. В оптике такие структуры называются брэгговскими волноводами. В настоящее время исследования генерации излучения быстрыми электронами в рентгеновских зеркалах проводятся на томском микротроне для энергии электронов 5,7 МэВ и области вакуумного ультрафиолета [13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреяшкин М.Ю., Забаев В.Н., Иошида К. и др. Рентгеновский источник на базе параметрического и переходного излучения электронов // Письма в ЖЭТФ. – 1995. – Т. 62. – Вып. 10. – С. 770–774.
2. Andreyashkin M.Yu., Kaplin V.V., Potylitsin A.P. et al. X-ray generation produced by relativistic electrons in compound “multifiled structure + crystal” targets // Nucl. Instrum. and

Meth. B 119. – 1996. – P. 108.
3. Zabaev V.N., Kaplin V.V., Kuznetsov S.I., Uglov S.R. X-Ray Transition Radiation of Electrons with Energy of 300 to 900 MeV in Periodic Multifoil Radiators // Physics of Particles and Nuclei. – 2014. – V. 2. – No. 45. – P. 508–515. DOI 10.1134/ S1063779614020063.
4. Андреяшкин М.Ю., Забаев В.Н., Каплин В.В. и др. Наблюдение формирования когерентного рентгеновского излучения 800 МэВ электронов в периодической трёхкристальной мишени // Письма в ЖЭТФ. – 1997. – Т. 65. – Вып. 8. – С. 504–599.
5. Takashima Y., Aramitsu K., Endo I. et al. Observation of monochromatic and tunable hard X radiation from stratified Si single crystals // Nucl. Instrum. and Meth. B 145. – 1998. – P. 25.
6. Kaplin V.V., Uglov S.R., Zabaev V.N. et al. Generation of X-rays by 850 MeV electrons in a novel periodic multicrystal structure on a GaAs plate surface // Nucl. Instrum. and Meth. A 448. – 2000. – P. 66.
7. Kaplin V.V., Kuznetsov S.I., Timchenko N.A. et al. X-rays production by 500 MeV electron beam in a periodically structured monocrystalline target of GaAs // Nucl. Instrum. and Meth. B 173. – 2001. – P. 238.
8. Kaplin V.V., Uglov S.R., Zabaev V.N. et al. Observation of bright monochromatic x rays generated by relativistic electrons passing through a multilayer mirror // Appl. Phys. Lett. – 2000. – V. 76. – P. 3647.
9. Гарибян Г.М., Ян-Ши. Рентгеновское переходное излучение. – Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1983. – 315 с.
10. Kaplin V.V., Sohoreva V.V., Uglov S.R. et al. Parametric X-rays generated by electrons in multilayer mirrors mounted inside a betatron // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B 267. – 2009. – P. 777.
11. Kaplin V.V., Sohoreva V.V., Uglov S.R. et al. X-rays generated by relativistic electrons in a waveguide radiator mounted inside a betatron // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B 269. – 2011. – P. 1518.
12. Kaplin V.V., Uglov S.R. Generation of X-rays by Relativistic Electrons in Waveguide Structures // Proceedings of the 7th International Forum on Strategic Technology (IFOST2012) IEEE CRP12786-PRT. – 2012. – V. 2. – P. 422.
13. Uglov S.R., Kaplin V.V., Zabaev V.N. Experimental setup on 5.7 MeV microtron for investigation of vacuum ultraviolet and ultrasoft X-ray radiations generated in a multilayer mirror // Nucl. Instrum. and Meth. B 309. – 2013. – P. 79-82.

Поступила 29.01.2015 г.