

## НАБЛЮДЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КОГЕРЕНТНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 800 МэВ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ТРЕХКРИСТАЛЬНОЙ МИШЕНИ

*М.Ю.Андреяшкин, В.Н.Забаев, В.В.Каплин<sup>1)</sup>, К.Накаяма<sup>+ 2)</sup>, С.Р.Углов,  
И.Эндо\* 2)*

*НИИ ядерной физики Томского политехнического университета  
634050 Томск, Россия*

*+ Toshiba Corporation  
210 Kawasaki, Japan*

*\* Hiroshima University  
739 Higashi-Hiroshima, Japan*

Поступила в редакцию 26 марта 1997 г.

На Томском синхротроне проведено исследование процесса формирования когерентного рентгеновского излучения 800-мегаэлектрон-вольтовых электронов в мишени, состоящей из трех кремниевых кристаллов 16 мкм. Конструкция мишени позволила, при ее вращении, наблюдать поочередно излучение из каждого кристалла, обусловленное сложением параметрического рентгеновского излучения (ПРИ) и дифрагированного резонансного переходного излучения (ДРПИ), рожденного на поверхностях предыдущих кристаллов. Полученная ориентационная зависимость показывает, что вклад ДРПИ увеличивается с увеличением номера кристалла так, что угловая плотность ДРПИ из третьего кристалла превышает плотность ПРИ примерно в 1,7 раза.

PACS: 41.60.-m

Недавно выполнены работы [1-4], в которых развивается новая концепция генерации когерентного рентгеновского излучения релятивистских электронов в сложных периодических структурах. Согласно ей, предлагается генерировать узконаправленное под большими углами к оси пучка электронов квазимонохроматичное рентгеновское излучение, пропуская электроны через составные мишени типа "слоистая структура + кристалл" или сборки из нескольких тонких, взаимноориентированных кристаллов. При этом возникает, помимо параметрического рентгеновского излучения (ПРИ), дополнительный вклад за счет дифракции рентгеновского переходного излучения.

Хорошо изученное ПРИ электронов, генерируемое в брэгговском направлении [5] в конус с углом раствора несколько  $\gamma^{-1}$  ( $\gamma$  – релятивистский фактор электрона), имеет ширину спектральной линии менее 10% при полном выходе около  $10^{-5}$  фотонов на электрон.

Резонансное рентгеновское переходное излучение (РПИ), возникающее при пролете электроном слоистой мишени [6], интенсивнее ПРИ, и для нескольких сотен тонких фольг его выход может составлять несколько фотонов на электрон. Энергии излучаемых фотонов РПИ лежат в области до  $E_\gamma \simeq \hbar\omega_p\gamma$ , где  $\omega_p$  – плазменная частота среды, а ширина спектральной полосы излучения

<sup>1)</sup> e-mail: kaplin@tsinph.tomsk.su

<sup>2)</sup> K.Nakayama, I.Endo.

составляет  $\sim 50-80\%$  в зависимости от поглощающих свойств материала радиатора. Фотоны РПИ излучаются в направлении движения электронов в конус с углом раствора в несколько  $\gamma^{-1}$ . Подбором толщин фольг и промежутков между ними можно изменять вид спектра и угол конуса излучения.

Согласно предложенной концепции, образованное в аморфной слоистой структуре РПИ затем дифрагирует на кристаллографических плоскостях в брэгговском направлении совместно с ПРИ. Если же мишень состоит из набора взаимноориентированных тонких кристаллов, то РПИ, образованное на поверхностях кристаллов, также дифрагирует в последующих кристаллах в брэгговском направлении совместно с ПРИ. Эксперименты, проведенные на Томском и Токийском синхротронах, показали, что новые источники рентгеновского излучения сочетают положительные качества РПИ (высокая интенсивность) и ПРИ (монохроматичность, большие углы излучения относительно пучка электронов). При этом выход излучения из сложных мишеней существенно превышает выход ПРИ из кристалла. Были измерены спектры и ориентационные зависимости излучения из упомянутых сложных мишеней, но исследование деталей формирования эмиссии фотонов из таких структур не проводилось.

В данной работе, благодаря особой конструкции трехкристальной мишени, наблюдался процесс формирования суммарного потока когерентного рентгеновского излучения (ПРИ + ДРПИ) в зависимости от числа пластин, участвующих в эмиссии (ДПРИ - дифрагированное резонансное переходное излучение).

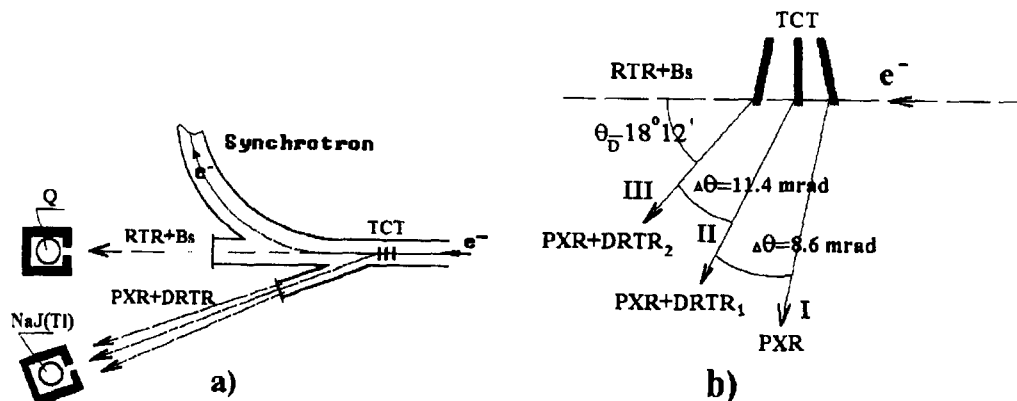


Рис.1. а) Схема эксперимента: *RTR* - рентгеновское переходное излучение, *B<sub>s</sub>* - тормозное излучение, *TCT* - трехкристальная мишень (triple-crystal target), *DRTR* - дифрагированное переходное излучение, *PXR* - параметрическое рентгеновское излучение, *Q* - квантометр. б) Геометрия генерации излучения в трехкристальной мишени. I, II и III - направления рефлексов излучений, испускаемых из первого, второго и третьего кристаллов, соответственно

Схема эксперимента приведена на рис.1а. Пучок ускоренных электронов Томского синхротрона с энергией  $E_e = 800 \text{ МэВ}$  сбрасывался на внутреннюю мишень. Основная слоистая кристаллическая мишень и монокристаллическая мишень эквивалентной толщины (48 мкм) для измерения "чистого" ПРИ были закреплены на гониометрической головке, перемещая которую вертикально, можно было располагать мишени на пучке электронов поочередно. Тормозное излучение регистрировалось гаусс-квантометром, показания которого исполь-

зовались для нормирования результатов измерений. Когерентное излучение, испускаемое из кристалла под углом  $\theta_D = 2\theta_B = 18^\circ 12'$ , выходило через бериллиевое окно камеры синхротрона толщиной 200 мкм и попадало в детектор. В качестве детектора использовался  $\gamma$ -спектрометр NaI(Tl) с толщиной кристалла 2 мм. Энергетическое разрешение составляло около 35% для  $^{57}\text{Co}$  (линия 6.4 кэВ) и 16% для  $^{241}\text{Am}$  (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.

Основная мишень состояла из трех кристаллов кремния толщиной 16 мкм, разделенных промежутками 147 мкм. Кристаллические пластинки были вырезаны так, что кристаллографические плоскости (220) перпендикулярны их поверхностям. Мишень была изготовлена в Toshiba Corporation и подробно описана в [7]. Крайние кристаллы, составляющие мишень, разориентированы относительно среднего на 4,3 и 5,7 мрад в разные стороны. При пропускании через такой радиатор узкого пучка электронов под некоторым углом к плоскостям (220) в геометрии Лауз, можно получить три хорошо разделенных рефлекса рентгеновского излучения в брэгговских направлениях (см.рис.1b), отличающихся на удвоенное значение угла взаимной разориентации кристаллов. Первый рефлекс излучения, испускаемый из первого кристалла, формируется за счет ПРИ (дифракцию переходного излучения, рожденного на входной поверхности этого кристалла не учитываем). Тогда второй рефлекс излучения – за счет ПРИ из второго кристалла и дифракции переходного излучения, рожденного на поверхностях первого кристалла. Третий рефлекс, соответственно, образован ПРИ из третьего кристалла и ДРПИ от предыдущих двух кристаллов. Измерив характеристики рефлексов, можно судить о процессе формирования когерентного рентгеновского излучения релятивистского электрона, пролетающего через сложную кристаллическую структуру.

В экспериментальном спектре ПРИ, полученном на эквивалентной мишени в брэгговской ориентации  $\Theta_B = 0,5 \Theta_D$  присутствуют спектральные пики первого и второго порядков. Отношение выходов фотонов ПРИ в интервалы энергий  $E_\gamma = 29 - 44$  и  $10 - 29$  кэВ, соответствующие второму и первому спектральным пикам, составляет 0,13. На эквивалентной мишени были также измерены ориентационные зависимости (ОЗ) выхода фотонов ПРИ в указанных энергетических интервалах.

На рис.2 приведена экспериментальная ОЗ (точки) выхода фотонов ПРИ + ДРПИ ( $E_\gamma = 10 - 29$  кэВ) из трехкристалльной мишени. Полученная ОЗ имеет три максимума, I, II и III, появляющихся при последовательной установке кристаллов, составляющих мишень, в брэгговские положения. Три штриховые кривые показывают парциальные вклады в общую картину ПРИ, образованного в каждом из кристаллов. Форма этих кривых была получена при обработке ОЗ излучения, измеренной на эквивалентной мишени. Сплошная кривая показывает ОЗ выхода ПРИ из трехкристалльной 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 (точки) суммарной ОЗ ПРИ (сплошная кривая).

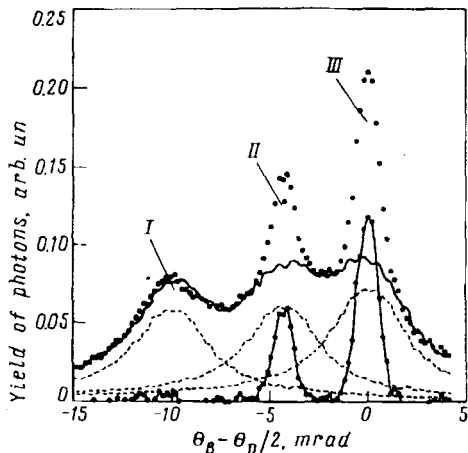


Рис.2. Измеренная ориентационная зависимость (точки) выхода в коллимированный детектор рентгеновского излучения, генерированного электронами 800 МэВ в трехкристалальной мишени. Штриховые кривые – вклады в ОЗ за счет ПРИ из трех кристаллов; сплошная кривая – сумма вкладов ПРИ; два пика (сплошная кривая с точками) – вклады за счет ДРПИ из первого (левый пик) и второго (правый пик) кристаллов

Рис.2 показывает, что пики в ОЗ парциальных выходов ДРПИ из отдельных кристаллов существенно уже, чем для выхода ПРИ. Их ширины составляют 1,25 и 4,75 мрад, соответственно. Таким образом, ДРПИ представляет собой значительно более узконаправленный источник рентгеновского излучения, чем ПРИ. Кроме того, из рисунка следует, что выход ДРПИ в максимуме ОЗ увеличивается с возрастанием номера кристалла так, что угловая плотность ДРПИ из третьего кристалла превышает плотность ПРИ примерно в 1.7 раза.

Согласно теории [6], угловое распределение резонансного переходного рентгеновского излучения определяется выражением

$$\Theta_R = \left( \frac{4\pi\hbar c}{E_\gamma(l_1 + l_2)} - \gamma^{-2} - \frac{l_1}{l_1 + l_2} \left( \frac{\hbar\omega_p}{E_\gamma} \right)^2 \right)^{0.5}, \quad (1)$$

где  $l_1$  и  $l_2$  – толщина кристаллов и величина промежутков между ними, соответственно. Важно отметить, что из (1) следует, что, изменяя параметры мишени, можно регулировать угловое распределение РПИ, а следовательно, и ДРПИ, в то время как ширина углового распределения ПРИ определяется только характеристиками кристалла [8]:

$$\Delta\Theta = \left( (1 + \sqrt{2})^2 [\gamma^{-2} + (\hbar\omega_p/E_\gamma)^2] + \langle \Theta \rangle_{ms}^2 \right)^{0.5}, \quad (2)$$

где  $\langle \Theta \rangle_{ms}^2$  – среднеквадратичный угол многократного рассеяния электронов в веществе мишени,  $\hbar\omega_{pSi} \approx 30$  эВ.

На рис.3 приведены спектры излучения, измеренные при последовательном повороте трехкристалльной мишени на углы, соответствующие симметричным положениям кристаллов. Когда первый кристалл расположен симметрично относительно электронного пучка и детектора (брэгговская ориентация), спектр излучения подобен спектру ПРИ. Отношение выходов излучения во второй и первый спектральные пики составляет 0,13. При установке мишени в положение, симметричное для второго кристалла, это отношение становится равным 0,11, из-за вклада ДРПИ, имеющего иную пропорцию выходов фотонов в первый и второй спектральные интервалы, как это было обнаружено в [2]. В положении, симметричном для третьего кристалла, когда вклад ДРПИ возрастает, полученное отношение падает до 0,09.

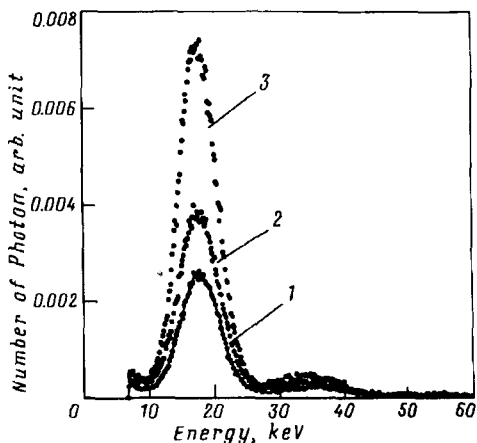


Рис.3. Спектры излучения из трехкристальной мишени, испускаемого в центры рефлексов I, II и III (кривые 1, 2 и 3)

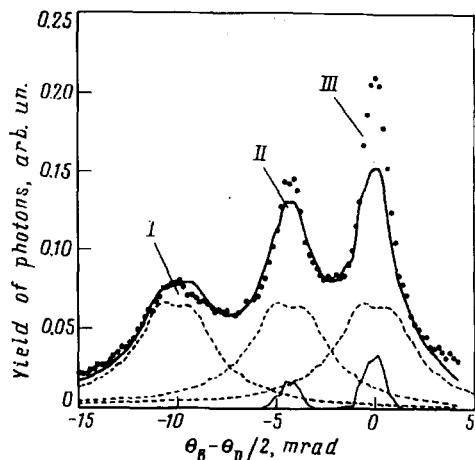


Рис.4. Сравнение эксперимента (точки) и расчетных ориентационных зависимостей ПРИ из трех кристаллов (штриховые кривые), ДРПИ из второго и третьего кристаллов (левый и правый пики, обозначенные тонкими кривыми) и сумма вкладов ПРИ и ДРПИ из всех кристаллов с учетом интерференции (жирная кривая)

На рис.4 приведено сравнение рассчитанных ОЗ выходов ПРИ и ДРПИ с экспериментом. Расчеты выполнены в кинематическом приближении. В расчетах использовались теоретические модели для ПРИ [8] и для ДРПИ [6] с учетом экспериментальных условий. Штриховые кривые показывают парциальные выходы ПРИ из трех кристаллов, тонкие сплошные кривые – выходы ДРПИ из второго и третьего кристаллов.

Сравнивая рис.4 и рис.2, можно сделать вывод, что расчетное соотношение выходов ДРПИ и ПРИ не соответствует полученному в эксперименте. А их сумма не описывает форму экспериментальной ориентационной зависимости. Мы сделали предположение, что anomalously высокий выход излучения в экспериментальных максимумах 2 и 3 связан с проявлением механизма интерференции ДРПИ и ПРИ. Учет интерференции проведен в модельном приближении – рассчитывался квадрат суммы амплитуд ДРПИ и ПРИ для всего конуса излучения, а затем учитывалась геометрия детектора. Полученная зависимость, показанная на рис.4 жирной кривой, гораздо лучше согласуется с экспериментом, хотя различие по-прежнему достаточно велико, особенно для пика III. Вероятно, для понимания наблюдаемого эффекта необходимы дополнительные исследования.

Основные итоги проведенного эксперимента следующие.

1. Использование оригинальной трехкристальной мишени со слегка взаимно разориентированными кристаллами позволило наблюдать процесс формирования дифрагированного на кристалле резонансного рентгеновского переходного излучения в зависимости от числа границ раздела сред, участвующих в генерации РПИ.

2. Полученные результаты подтверждают выводы работ [2-4], что размещение перед кристаллом слоистой структуры, как источника РПИ, приводит к эффективному увеличению выхода рентгеновского излучения, под большими (брегговскими) углами к пучку электронов по сравнению со случаем "чистого" ПРИ.

3. Угловое распределение ДРПИ существенно уже распределения ПРИ и может регулироваться изменением параметров слоистой структуры, расположенной перед кристаллом. Как следствие более узкого углового распределения, спектральные пики ДРПИ будут более монохроматичными, чем пики ПРИ. Кроме того, показано, что доля вклада высоких гармоник в спектре ДРПИ существенно меньше, чем в спектре ПРИ.

4. Анализ соотношения вкладов ДРПИ и ПРИ в формирование ориентационной зависимости излучения из трехкристалльной мишени показывает, что эти компоненты могут складываться синергическим образом. То есть результирующее излучение является не просто суммой ДРПИ и ПРИ, а результатом их интерференции. Но этот вопрос требует дальнейших более детальных исследований.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 95-02-06194 и 96-02-16785), а также в рамках Российско-Японской объединенной научной программы "Излучение релятивистских электронов в периодических структурах" Госкомвуза России.

- 
1. M.Yu.Andreyashkin, V.V.Kaplin, V.N.Zabaev et al, Proc. of the Int. Symp. on Rad. of Rel. Elect. in Period. Structures (RREPS-93, Tomsk, Russia). NPI TPU (1993), p. 86.
  2. M.Yu.Andreyashkin, V.V.Kaplin, E.I.Rozum et al., Proc. of the 2nd Int. Symp. on Rad. of Rel. Elect. in Period. Structures (RREPS-95, Tomsk, Russia). Cambridge Int. Scien. Publ. (1996), p. 36.
  3. М.Ю.Андреяшкин, В.Н.Забаев, В.В.Каплин и др., Письма в ЖЭТФ **62**, 770 (1995).
  4. K.Aramitsu, I.Endo, K.Goto et al., Hiroshima University Preprint HUPD-9513 (1995).
  5. М.Л.Тер-Микаелян, *Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях*, Ереван: Изд. АН Арм.ССР, 1969.
  6. Г.М.Гарибян, Ян-Ши, *Рентгеновское переходное излучение*, Ереван: Изд. АН Арм.ССР, 1983.
  7. K.Nakayama, M.Sekimura, I.Yanase et al. Proc. of the 2nd Int. Symp. on Rad. of Rel. Elect. in Period. Structures (RREPS-95, Tomsk, Russia). Cambridge Int. Scien. Publ. (1996), p. 240.
  8. I.D.Feranchuk and A.V.Ivashin, J.Physique **46**, 1981 (1985).