

РЕНТГЕНОВСКИЙ ИСТОЧНИК НА БАЗЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО И ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

М.Ю.Андреяшкин¹⁾, В.Н.Забавев, К.Иошида^{*2)}, В.В.Каплин, Е.И.Розум, С.Р.Углов, И.Эндо⁺²⁾

НИИ Ядерной физики Томского политехнического университета
634030 Томск, Россия

** Institute for Nuclear Study, University of Tokyo
Tanashi 188, Japan*

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

Поступила в редакцию 16 октября 1995 г.

На Томском синхротроне "Сириус" проведено экспериментальное исследование нового типа источника жесткого (10–40 КэВ) рентгеновского излучения, получаемого при пропускании 700 МэВ электронов через составную мишень (слоистая структура + кристалл). Показано, что для мозаичного кристалла интенсивность дифрагированного резонансного рентгеновского переходного излучения значительно превышает интенсивность параметрического рентгеновского излучения электронов. Анализируются угловые распределения этих излучений. Проведено сравнение спектральных плотностей переходного, дифрагированного переходного и параметрического рентгеновских излучений электронов.

Параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ) электронов, генерируется при пролете электрона в кристалле благодаря дифракции псевдофотонов собственного поля электрона [1]. Ширина линии ПРИ может быть порядка 10 и меньше процентов. Фотоны ПРИ излучаются в брэгговском направлении в узкий конус с углом раствора несколько γ^{-1} в зависимости от характеристик кристалла (γ -релятивистский фактор электрона). Однако интенсивность излучения ПРИ не высока, около 10^{-5} фотонов на электрон.

Рентгеновское переходное излучение (РПИ) возникает при пролете электроном границы раздела двух сред с различной диэлектрической проницаемостью [2]. Выход рентгеновского излучения из радиатора, состоящего из нескольких сотен тонких фольг может составлять несколько фотонов на электрон. Спектр излучаемых фотонов РПИ лежит в области энергий до $E_\gamma \simeq \hbar\omega_p\gamma$, где ω_p – плазменная частота среды, ширина спектральной полосы излучения составляет около 50–80% в зависимости от поглощающих свойств материала радиатора. Фотоны РПИ излучаются в направлении движения электронов в конус с углом раствора порядка γ^{-1} . Если толщину фольг и расстояние между ними в слоистой структуре подобрать таким образом, чтобы РПИ с различных фольг радиатора излучалось когерентно, то при этом наблюдается так называемое резонансное РПИ (РРПИ). Спектрально угловая интенсивность РРПИ растет пропорционально M^2 (где M – число фольг), а угол конуса излучения можно варьировать в пределах нескольких γ^{-1} , в зависимости от параметров слоистой структуры.

¹⁾e-mail: andre@tsinph.tomsk.su

²⁾К.Yoshida, I.Endo

В работе [3] была предложена новая концепция получения интенсивного, монохроматического, регулируемого и узконаправленного под большими углами к пучку электронов рентгеновского излучения на основе составной мишени – "слоистая структура + кристалл". В этом случае генерируемое в слоистой структуре РРПИ дифрагирует на кристалле и совместно с ПРИ излучается в брэгговском направлении. Ожидается, что получаемое в этом случае дифрагированное РРПИ (ДРПИ) будет обладать положительными качествами как РРПИ (узконаправленность, высокая интенсивность), так и ПРИ (монохроматичность, большие углы излучения).

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования характеристик РРПИ, ПРИ и ДРПИ, генерируемых электронами в слоистой медной мишени, кристалле пиролитического графита и составной мишени. Работа выполнена на внутреннем пучке Томского синхротрона "Сириус". Энергия ускоренных электронов составляла $E_e = 700$ МэВ. Подробно характеристики синхротрона приведены в [4]. Нормировка результатов измерений проводилась с помощью детектора синхротронного излучения ускоренных электронов.

Схема эксперимента приведена на рис.1. Составная мишень (compound target – СТ) состояла из слоистой мишени (multifoil target – МТ) на основе медных фольг и кристалла пиролитического графита (pyrolytic graphite – РГ). МТ была изготовлена из 9 медных фольг, толщиной 12 мкм, с промежутками между ними 52 мкм. Кристалл РГ, изготовленный компанией Union Carbide Inc., имел размеры $10 \times 6 \times 1.5$ мм. Ранее, этот кристалл использовался в работе [5]. Угол между импульсом электрона и кристаллографическими плоскостями (200) $\theta_B = 9^\circ 06'$. Методика установки и ориентации кристалла РГ на электронном пучке приведена в [5]. Для измерения "чистого" РРПИ и ПРИ имелась возможность поочередно убирать с электронного пучка либо кристалл РГ, либо МТ.

В качестве детектора использовался NaI(Tl) – γ -спектрометр с толщиной кристалла 1 мм. Энергетическое разрешение составляло 50% для ^{57}Co (линия 14.6 кэВ) и 25% для ^{241}Am (59.6 кэВ). Порог регистрации был установлен на уровне 7 кэВ. Входное бериллиевое окно детектора имело диаметр 24 мм и толщину 200 мкм. Для сравнения характеристик РРПИ, ПРИ и ДРПИ детектор устанавливался в двух положениях: на прямом пучке и под углом $\theta_D = 18^\circ 12'$. Расстояние между СТ и детектором в обоих случаях было равно 458 см, из них 243 см – воздуха. Выходные фланцы вакуумной камеры выполнены из бериллия толщиной 200 мкм.

На рис.2 приведены аппаратурные спектры ПРИ и ДРПИ. На рисунке видны первый и второй порядки этих излучений. При измерении данных спектров устанавливался верхний порог регистрации около 40 кэВ. Вследствие более сильного поглощения в воздухе амплитуда первого пика ниже, чем второго. Из рисунка следует, что превышение спектра ДРПИ над спектром ПРИ составляет примерно 2.4 раза.

Оценим ширину спектральной линии рефлекса как $\Delta E \simeq E_\gamma \cdot \Delta\theta \cot \theta_B$. Известно [6], что для коллимированного ПРИ параметр $\Delta\theta$ определяется только двумя составляющими θ_{mos} – мозаичность кристалла и θ_{ap} – апертура детектора. Эти же составляющие будут определять и ширину спектральной линии ДРПИ. Таким образом, можно утверждать, что при коллимации рентгеновского пучка, размещение перед кристаллом мишени из металлических фольг не приведет к заметному уширению спектральных линий рентгеновского источ-

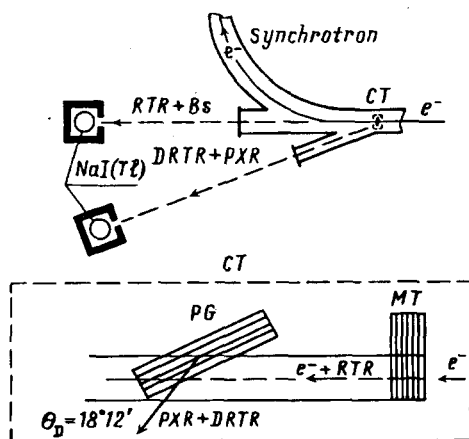


Рис.1.

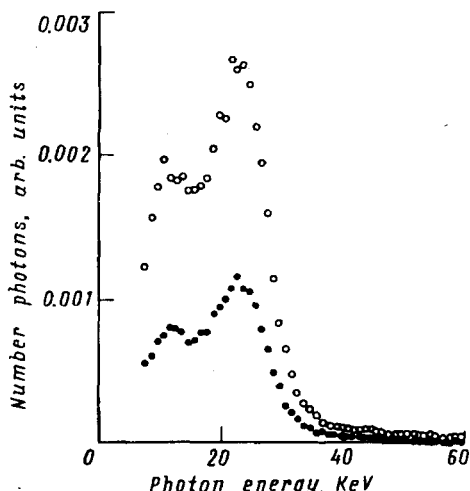


Рис.2.

Рис.1. Схема эксперимента: RTR - рентгеновое переходное излучение, Bs - тормозное излучение, CT - составная мишень (compound target), DRTR - дифрагированное переходное излучение, PXR - параметрическое рентгеновое излучение, PG - кристалл пиролютического графита, MT - слоистая мишень (multifoil target)

Рис.2. Измеренные спектры ДРПИ(●) и ПРИ(□)

ника на основе ДРПИ, в то время как интенсивность излучения значительно возрастает.

Для ПРИ ширину углового распределения запишем в виде

$$\Delta\theta^2 \sim \theta_{mos}^2 + \gamma^{-2} + (\hbar\omega_{PG}/E_\gamma)^2 + \langle \theta \rangle_{ms}^2, \quad (1)$$

где $\langle \theta \rangle_{ms}^2$ - среднеквадратичный угол многократного рассеяния электронов в веществе мишени, $\hbar\omega_{PG} \approx 31$ эВ. Для ДРПИ

$$\Delta\theta^2 \sim \theta_R^2 + \theta_{mos}^2 + \langle \theta \rangle_{ms}^2, \quad (2)$$

где

$$\theta_R^2 = \frac{4\pi\hbar cr}{E_\gamma(l_1 + l_2)} - \gamma^{-2} - \frac{l_2}{l_1 + l_2} \left(\frac{\hbar\omega_p c_u}{E_\gamma} \right)^2$$

- квадрат радиуса кольцевого распределения фотонов РРПИ; l_1 и l_2 - расстояние между фольгами и толщина фольг в МТ, соответственно, r - номер гармоники, $\hbar\omega_{pCu} \approx 60$ эВ. Следует заметить, что параметры, входящие в выражения (1) и (2), определяют и ширины ориентационных зависимостей ПРИ и ДРПИ.

Наибольшей величиной в выражениях (1) и (2) является, в нашем эксперименте, $\theta_{mos} \approx 7$ мрад [5] ($\gamma^{-1} = 0,7$ мрад, $\langle \theta \rangle_{ms} \approx 2,2$ мрад для кристалла PG и $\approx 1,6$ мрад для МТ, θ_R порядка γ^{-1}). Поэтому ширины угловых распределений ПРИ и ДРПИ будут определяться одной и той же величиной - θ_{mos} . Это должно привести к тому, как отмечалось выше, что и ширины ориентационных зависимостей ДРПИ и ПРИ не должны существенно различаться.

На рис.3 приведены измеренные ориентационные зависимости ДРПИ и ПРИ. При проведении этих измерений регистрировалось число фотонов в диапазоне 7–30кэВ в зависимости от угла поворота кристалла РГ вокруг вертикальной оси. Из рисунка следует, что интенсивность ДРПИ превышает интенсивность ПРИ в максимуме ориентационной зависимости в 2,2 раза, что соответствует спектральным измерениям, см.рис.2. Полная ширина на половине высоты для обеих ориентационных зависимостей составляет $\sim 10,5$ мрад, то есть различия в ширинах ориентационных зависимостей мы не обнаружили.

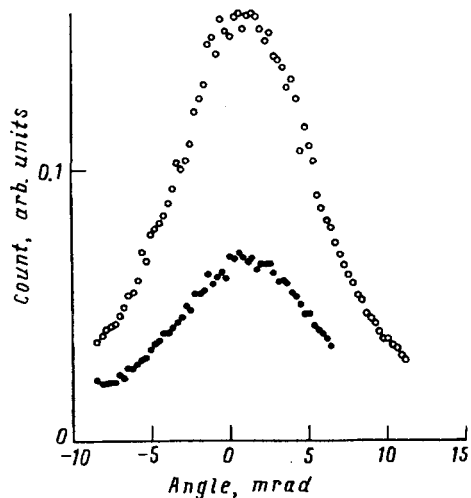


Рис.3. Ориентационные зависимости ДРПИ(о) и ПРИ(•)

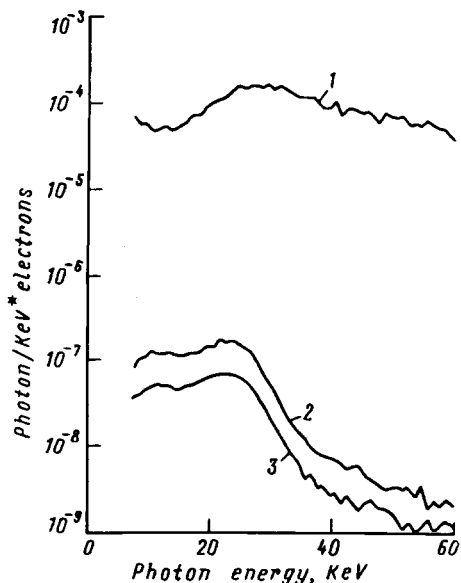


Рис.4. Экспериментальные спектры РРПИ(1), ДРПИ(2) и ПРИ(3)

На рис.4 приведены для сравнения измеренные спектры РРПИ, ДРПИ и ПРИ в единицах $\text{photon}/\text{electron keV}$. Так как спектр РРПИ достаточно широк [2], то разрешение детектора не оказывает существенного влияния на его форму. Поэтому кривая 1 на рис.4 показывает зависимость спектральной плотности РРПИ $\Delta N/\Delta\omega$ от энергии фотонов. Расчетные ширины спектральных линий ПРИ и ДРПИ для данных $\theta_{\text{моз}}$ и $\theta_{\text{ар}}$, для энергий фотонов 11 и 22кэВ приблизительно равны $\Delta E \approx 0,5$ и 1кэВ, соответственно. Однако разрешение детектора "размывает" эти линии в измеряемых спектрах. Поэтому для оценки спектральных плотностей ПРИ и ДРПИ суммировалось число фотонов в экспериментальных спектрах в диапазонах 7–16 и 18–27кэВ и нормировалось на ожидаемые ширины спектральных линий. В результате было получено, что спектральная плотность РРПИ на линии 11кэВ превышает спектральную плотность ПРИ примерно в 5 раз, а ДРПИ – в 2 раза. Для энергий фотонов 22кэВ это превышение составляет 16 и 7 раз, соответственно.

В заключение подведем основные итоги работы.

1. Экспериментально обнаружен эффект дифракции переходного излучения, генерированного в радиаторе из медных фольг на кристалле пиролитического

графита. Измерены в одних экспериментальных условиях спектры РРПИ, ДРПИ, ПРИ и проведено их сравнение.

2. Постановка перед кристаллом *слоистой структуры* приводит к значительному увеличению выхода рентгеновского излучения, испускаемого под большими (брэгговскими) углами, по сравнению со случаем "чистого" ПРИ.

3. Использование мозаичных кристаллов приводит к тому, что угловые характеристики ДРПИ слабо отличаются от угловых характеристик ПРИ при постановке на электронный пучок МТ общей толщиной $7.5 \cdot 10^{-3}$ рад.длин.

Таким образом источник ДРПИ на основе составной мишени — "слоистая структура + мозаичный кристалл" по своим угловым характеристикам будет слабо отличаться от источника ПРИ, в то же время значительно превосходя его по интенсивности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 95-02-06194), Международного научного фонда (грант J7C100), а также в рамках Российско-Японской объединенной научной программы "Излучение релятивистских электронов в периодических структурах" Госкомвуза России.

-
1. М.Л.Тер-Микаелян, *Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях*, Ереван: Изд. АН Арм.ССР, 1969.
 2. Г.М.Гарибян, Ян-Ши, *Рентгеновское переходное излучение*, Ереван: Изд. АН Арм.ССР, 1983.
 3. M.Yu.Andreyashkin, V.V.Kaplin, A.P.Potylitsin et al., Proc. of Intern. Symposium on Radiation of Relativistic Electrons in Periodical Structures, Tomsk, Russia, September 6-10, 1993.
 4. М.Ю.Андреяшкин, В.Н.Забаев, Б.Н.Калинин и др., ПТЭ №6, 55 (1989).
 5. К.Ю.Амосов, М.Ю.Андреяшкин, В.А.Верзилов и др., Письма в ЖЭТФ 60, 506 (1994).
 6. R.V.Fiorito, D.W.Rule, X.K.Maruyama et al., Proc. of Intern. Symposium on Radiation of Relativistic Electrons in Periodical Structures, Tomsk, Russia, September 6-10, 1993.