

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ВБЛИЗИ К-КРАЯ ПОГЛОШЕНИЯ Ge

Ю.Н. А д и ш е в, Р.Д. Б а б а д ж а н о в,
В.А. В е р з и л о в, С.А. В о р о б ь е в,
В.В. К а п л и н, А.П. П о т ы л и ц ы н,
С.Р. У г л о в

Теоретические исследования параметрического рентгеновского излучения (ПРИ) [1, 2] указывают на существенную зависимость выхода излучения от поглощающей способности кристалла-радиатора. Это легко понять, учитывая тот факт, что излучение в основном собирается с участка траектории частицы, прилегающего к выходной поверхности кристалла и имеющего размеры порядка длины поглощения. Исключением, пожалуй, является только случай предельно-асимметричной дифракции [3]. С точки зрения поглощающих свойств веществ интересны области вблизи линий поглощения, где эти свойства претерпевают резкие изменения в сравнительно небольшом диапазоне энергий и где, согласно теории ПРИ, должны существенно меняться характеристики излучения.

В настоящей работе представлены результаты первого экспериментального исследования ПРИ в монокристалле (111) Ge толщиной 0.17 мм, образованного пролетающими через него электронами с энергией 900 мэВ вблизи углов Брэгга, близких к $\theta_c = 9^\circ$. Эксперимент проводился на внутреннем пучке Томского синхротрона. Особенности экспериментальных условий и установка описывались ранее [4, 5]. В качестве детектора использовался пропорциональный координатный детектор с входным окном размером 10×25 мм.

Данная геометрия эксперимента была выбрана в связи с тем, что для брэгговских углов, близких к $\theta = 9^\circ$, энергия квантов ПРИ рефлекса (111) для Ge оказывается в районе К-края поглощения ($E_{K\gamma} = 11.1$ кэВ). При этих условиях были измерены ориентационные зависимости (ОЗ) выхода излучения от угла ориентации плоскостей (111) относительно направления пучка электронов для нескольких положений детектора. Известно, что энергия фотонов ПРИ жестко связана с θ углом между кристаллографической плоскостью и пучком электронов и θ_D углом наблюдения соотношением:

$$E_{\gamma} = \hbar\omega = \hbar c |\vec{r}| \sin\theta (1 - \cos\theta_D)^{-1}, \quad (1)$$

где $|\vec{r}|$ – модуль вектора обратной решетки. В процессе измерения каждой ОЗ угол наблюдения фиксировался, а изменение θ угла ориентации приводило к смещению линии ПРИ. Так осуществлялось изменение положения спектральной линии ПРИ относительно К-края поглощения. На входе детектора помещался свинцовый

коллиматор в виде вертикальной щели длиной 25 и шириной 2 мм, расположенной перпендикулярно плоскости образованной вектором импульса электрона \vec{p} и \vec{z} . Угловой захват коллиматора по ширине составлял 1 млрд, что, согласно выражения (1), обеспечило в нашей геометрии для каждой точки ОЗ разброс излучения по энергии $\Delta E_{\gamma} \approx 70$ эв. Энергетическое разрешение детектора составляло около 1,5 кэВ. Выход ПРИ для заданной геометрии определялся площадью под зарегистрированной спектральной линией после вычета фонового спектра.

На рис. 1 приведены нормированные на максимум ориентационные зависимости выхода излучения для двух положений детектора: $\theta_D = 17^\circ 48' \pm 10'$ и $\theta_D = 19^\circ 29' \pm 10'$. Сверху приведены соответствующие энергетические шкалы для ориентационных зависимостей, полученные по формуле (1), для того, чтобы представить полученные ОЗ как спектральные линии ПРИ. Сплошными кривыми показана энергетическая зависимость μ коэффициента поглощения кристалла $G\epsilon$ в районе энергии К-края [6]. Штриховой кривой показана предполагаемая форма спектральной линии ПРИ при $\mu = const \approx \approx 200$ см/г. Стрелками показаны береговские направления излучения рентгеновских фотонов $\theta_B = \theta_D/2$.

В первом случае линия ПРИ находится далеко от К-края поглощения (рис. 1, а), поэтому форма линии имеет обычный колоколообразный вид без каких-либо особенностей. Во втором случае (рис. 1, б) положение К-края поглощения приходится на линию ПРИ, поэтому форма линии сильно видоизменяется. За счет резкого изменения коэффициента поглощения μ наблюдается скачок спектральной плотности излучения на энергии К-края поглощения с отношением интенсивности излучения слева и справа от $E_{K\mu}$ равным примерно 3. Расчеты проведенные нами по формулам работы [2] с усреднением по размерам коллиматора дают значение отношения 2.48, что удовлетворительно согласуется с результатами эксперимента.

Из-за связи (1) энергии рентгеновских фотонов и направления излучения относительно направления пучка электронов и кристаллографической плоскости скачкообразное изменение коэффициента поглощения на К-крае сильно влияет и на форму углового распределения ПРИ. Рис. 2 иллюстрирует эволюцию формы углового распределения излучения в области К-края поглощения при постепенной разориентации кристалла и фиксированном положении детектора, вызванную тем, что при изменении угла θ происходит не только смещение линии ПРИ по энергии, как в первом эксперименте, но и смещение по углу наблюдения (для ПРИ угол наблюдения максимума интенсивности дифракционного пятна расположен под углом $\theta = 2\theta_B$ к пучку электронов). Измерения проводились при щели коллиматора 10 x 25 мм, расположенной в плоскости, образованной векторами \vec{p} и \vec{z} . Путем амплитудной дискриминации сигналов с детектора выделялся вклад излучения в интервале энергий $E_{\gamma} = 1.2 \pm 2$ кэВ, соответствующем положению линии ПРИ с учетом изменения ее энергии в пределах данной геометрии. Уровень фона, обусловленный,

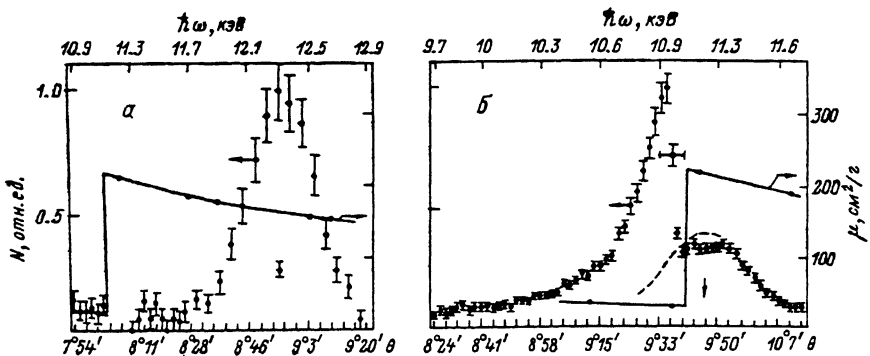


Рис. 1. Ориентационные зависимости точки выхода параметрического рентгеновского излучения для $\theta_D = 17^\circ 48' + 10'$ (а) и $\theta_D = 19^\circ 29' + 10'$ (б). Сплошные кривые — энергетическая зависимость $\mu(E_\gamma)$ коэффициента поглощения Ge кристалла. Штриховая кривая — предполагаемая форма линии ПРИ при $\mu(E_\gamma) = const \approx 20 \text{ см}^2/\text{г}$. Стрелками показаны брегговские направления.

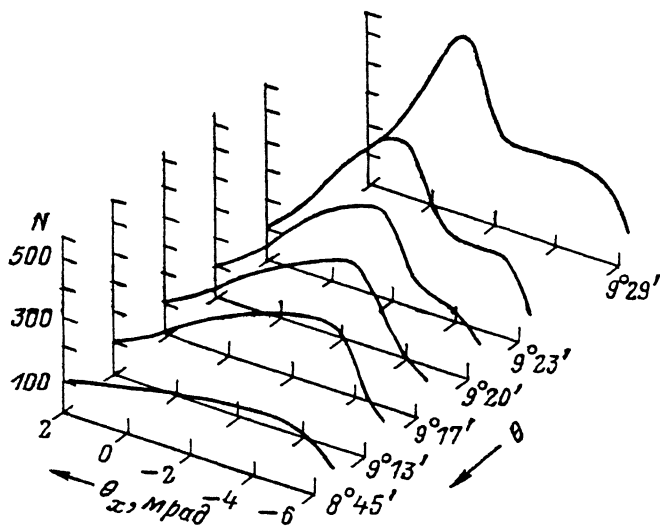


Рис. 2. Эволюция формы углового распределения излучения в области К-края поглощения при постепенной разориентации кристалла от $\theta = 8^\circ 46'$ до $\theta = 9^\circ 29'$.

в частности, характеристическим излучением германия ($E_{\gamma} = 10.1$ кэВ), показывает кривая при $\theta = 8^{\circ}46'$. На оси θ_x , которая параллельна щели коллиматора, отложены значения разности $\theta_D - \theta_D^{\circ}$, где $\theta_D^{\circ} = 19^{\circ}29' \pm 10'$ — угол между пучком электронов и направлением на середину щели коллиматора. Из угловых распределений видно, что имеет место быстрый подъем интенсивности излучения в направлениях, близких к направлению излучения фотонов с энергией около К-края поглощения. Скачок в энергетической зависимости μ приводит к асимметрии формы углового распределения, т.к. повышается выход фотонов с энергией ниже К-края поглощения, что соответствует большим углам вылета относительно (111) кристаллографической плоскости. При изменении угла θ распределения не сохраняют своей формы вследствие изменения угла вылета рентгеновских фотонов с энергией вблизи К-края поглощения. При угле $\theta = 9^{\circ}29'$ угловое распределение имеет наиболее асимметричную форму, т.к. здесь угол вылета фотонов с энергией около $E_{\gamma} = 11.1$ кэВ практически совпадает с центром углового распределения. При меньших θ распределение деформируется в меньшей степени, т.к. угол выхода фотонов с $E_{\gamma} = E_{K\gamma}$ приходится на их правый склон, где интенсивность излучения наименьшая.

В заключение заметим, что обнаруженный эффект можно использовать для увеличения спектрально-угловой плотности и степени монохроматичности излучения. Проведенные исследования показывают, что ПРИ может явиться основой для исследования кристаллических образцов, в которых оно образуется, по тонкой структуре линии поглощения, как, например, в методе EXAFS — спектроскопии. Кроме того, по ширине скачка интенсивности в ориентационной зависимости выхода ПРИ (рис. 1, б) можно судить о многократном рассеянии электронного пучка внутри кристалла, блочности и мозаичности кристалла, причем с большей точностью, чем по уширению углового распределения полученного вдали от особой точки в энергетической зависимости коэффициента поглощения.

С п и с о к л и т е р а т у р ы .

- [1] Афанасьев А.М., Аглиян М.А. // ЖЭТФ. 1978. Т. 74. В. 2. С. 570–579.
- [2] Франчук И.Д., Ивашин А.И. // J. Physique. 1985. V. 46. N 11. P. 1981–1986.
- [3] Барышевский В.Г., Грубич А.О., Франчук И.Д. // ЖЭТФ. 1986. Т. 90. В. 5. С. 1588–1595.
- [4] Адисhev Ю.Н., Воробьев С.А. и др. // ЖЭТФ. 1986. Т. 90. В. 3. С. 829–837.
- [5] Адисhev Ю.Н., Бабаджанов Р.Д. и др. // ЖЭТФ. 1987. Т. 93. В. 6(12). С. 1943–1950.
- [6] Блохин М.А., Швейцер И.Г. Рентгеноспектральный справочник. М.: Наука, ГРФМЛ, 1982.

Научно-исследовательский институт ядерной физики при Томском политехническом институте

Поступило в Редакцию
15 августа 1989 г.
В окончательной редакции
17 января 1990 г.