

## ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА КАНАЛИРОВАНИЯ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА СПЕКТР КОГЕРЕНТНОГО ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ТИПА *B*

*К.Ю.Амосов, И.Е.Внуков, Б.Н.Калинин, Г.А.Науменко,  
А.П.Потылицын, В.П.Сарычев*

*НИИ ядерной физики Томского политехнического университета  
634061, Томск*

Поступила в редакцию 31 марта 1992 г.

Проведено измерение спектров когерентного тормозного излучения типа *B* электронов с энергией  $E_0 = 300$  МэВ в монокристалле алмаза. При движении электронов вдали от кристаллографических направлений спектр излучения хорошо описывается стандартной теорией когерентного тормозного излучения. При выполнении условий каналирования наблюдается значительное расхождение с теорией и наблюдается уширение спектра излучения, что связано, по нашему мнению, с "расщеплением" спектральной линии из-за влияния усредненного потенциала оси или плоскости кристалла.

В последнее время повысился интерес к когерентным процессам типа *B*<sup>1</sup>, в которых в отличие от когерентных процессов типа *A* квантуется и продольный импульс, переданный кристаллу<sup>2,3</sup>. В частности в<sup>4</sup> предложено использовать когерентное тормозное излучение типа *B* электронов средних энергий ( $E_0 \leq 100$  МэВ) как источник квазимонохроматичных фотонов с энергией  $\omega = (0,7 \div 0,9)E_0$  и монохроматичностью  $\Delta\omega/\omega \leq 1\%$ .

Согласно теории<sup>1</sup> интенсивность и монохроматичность когерентного тормозного излучения (КТИ) типа *B* максимальна при падении электронов вдоль плотноупакованных осей кристалла. С увеличением угла разориентации интенсивность спадает, а монохроматичность ухудшается. Так, например, для энергии электронов 300 МэВ и толщины кристалла алмаза 0,171 мм разориентация оси  $\langle 111 \rangle$  на 10 мрад приводит к уменьшению интенсивности в пике на 30% и ухудшению монохроматичности в 2 раза по сравнению с осевой ориентацией. С другой стороны, известно, что частицы, направленные вдоль оси кристалла со значительной вероятностью захватываются в режим каналирования, что может влиять на спектр КТИ типа *B*. Экспериментальные исследования влияния каналирования на спектр КТИ типа *B* не проводились и поэтому представляют несомненный интерес.

Эксперимент проведен на Томском синхротроне с монохроматичностью электронного пучка  $\Delta E_0/E_0 \leq 1\%$ , расходимостью  $\Delta\vartheta \approx 0,2 \div 0,3$  мрад и углом коллимации излучения  $\vartheta_\gamma = 0,6$  мрад. В качестве мишени использовался монокристалл естественного алмаза с ориентацией  $\langle 111 \rangle$ , толщиной 0,171 мм и мозаичностью не хуже 0,2 мрад. Точность ориентации кристалла была не хуже 0,2 мрад.

Измерения выполнены с помощью парного магнитного  $\gamma$ -спектрометра (ПМС). Зависимость эффективности ПМС от энергии фотонов определялась экспериментально путем сопоставления измеренного спектра от аморфной мишени со спектром Шиффа, который рассчитывается с хорошей точностью для любой толщины мишени. Разрешение спектрометра (FWHM) составляло для энергии фотонов  $\omega = 250$  МэВ примерно 5 МэВ<sup>5</sup>.

На рис.1 приведен измеренный спектр интенсивности КТИ типа *B* для энергии электронов  $E_0 = 300$  МэВ. Угол разориентации оси  $\langle 111 \rangle$   $\psi_V = 8$  мрад, угол разориентации плоскости  $(11\bar{2})$   $\psi_H = 2,2$  мрад. Данная ориентация соответствует области углов, в которой реализуется КТИ типа *B*<sup>4</sup>. Здесь же

приведен расчетный спектр для этих условий, "сглаженный" заданным аппаратным разрешением и нормированный на некогерентную подложку. В расчете учтено накопление угла многократного рассеяния при прохождении частицы через мишень и влияние внеосевой коллимации излучения от рассеянных электронов, которые движутся в направлении, не совпадающем с раствором коллиматора. Методика расчета, основанная на теории КТИ подробно описана в <sup>6</sup>.

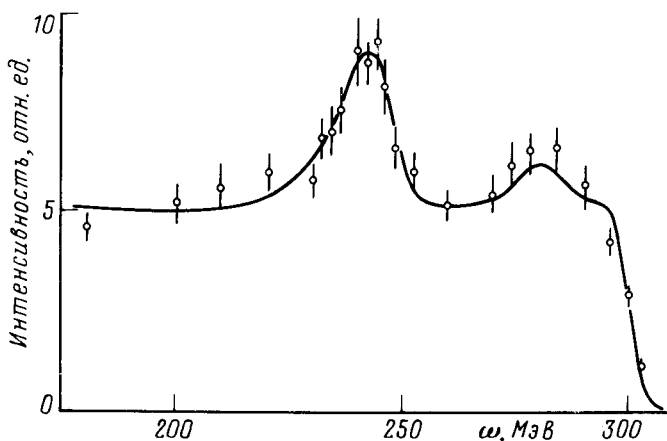


Рис.1. Спектр интенсивности КТИ типа В при отсутствии каналирования. Точки - эксперимент, линия - сглаженный расчет

Из рисунка видно, что для ориентации кристалла, соответствующей движению электрона вдали от кристаллографических направлений, наблюдается хорошее согласие расчетного и экспериментального спектров. Интенсивность КТИ типа В сравнима с интенсивностью некогерентной подложки, а собственная монохроматичность (FWHM) не хуже 5%, хотя использовался кристалл значительной толщины.

На следующих рисунках приведены экспериментальные и расчетные спектры интенсивности для осевой ориентации кристалла - рис.2 и для плоскостной (11 $\bar{2}$ ) ориентации кристалла - рис.3 (угол разориентации от оси  $\psi_V = 6$  мрад). Из сравнения экспериментальных и расчетных спектров видно, что выполнение условий каналирования приводит к искажению спектров КТИ типа В. Центр тяжести пика соответствует теории, его амплитуда уменьшается почти в два раза, а ширина на полувысоте существенно увеличивается.

Наиболее вероятной причиной обнаруженного эффекта является "расщепление" пика КТИ из-за влияния эффекта каналирования. Возможность такого эффекта неоднократно обсуждалась в литературе (см., например, <sup>7,8</sup>). Согласно <sup>7,8</sup> из-за влияния потенциала оси или плоскости в КТИ наряду с основным пиком с энергией  $\omega_{КТИ}$  возможно появление комбинационных частот  $\omega_k = \omega_{КТИ} \pm k\omega_{КАН}$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ), где  $\omega_{КАН}$  - энергия излучения каналированной частицы. Для энергии электронов  $E_0 = 300$  МэВ вместо одной частоты  $\omega_{КАН}$  имеется непрерывный спектр с частотой, соответствующей максимуму <sup>9</sup>:

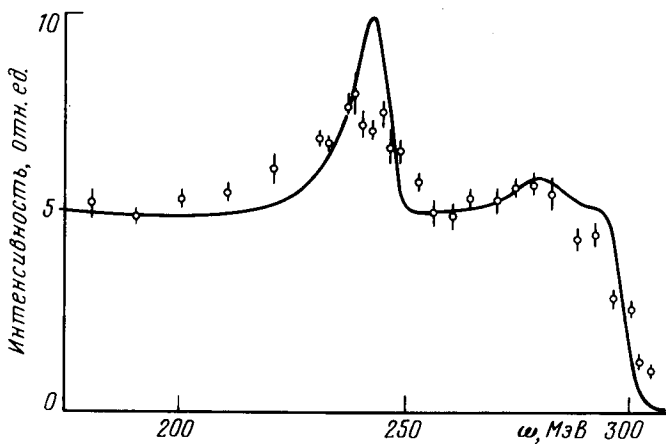


Рис.2. Спектр интенсивности КТИ типа В для условий осевого  $\langle 111 \rangle$  каналирования. Точки - эксперимент, линия - расчет

$$\omega_{\text{кан., ось}} = 2\gamma^2 \sqrt{2U_0/mc^2\gamma/a},$$

$$\omega_{\text{кан., пл.}} = 2\pi E_0 \sqrt{2U_0/m^2c^4/d},$$

где  $u_0$  - глубина потенциальной ямы, оси или плоскости;  $a$ , - радиус экранирования и  $d$  - межплоскостное расстояние. Остальные обозначения являются общепринятыми.

Ясно, что в этом случае "комбинационное расщепление" будет проявляться в виде эффективного уширения спектров КТИ типа В. В таблице приведены ширины экспериментальных  $\Delta\omega_{\text{экс}}$  и расчетных спектров -  $\Delta\omega_p$  для трех ориентаций кристалла. Здесь же приведены характерные энергии излучения при каналировании.

Ориентация	$\Delta\omega_p$ МэВ	$\Delta\omega_{\text{экс}}$ МэВ	$\omega_{\text{кан}}$ МэВ
$\langle 111 \rangle$	10,5	$24 \pm 3$	3,4
(112)	13,5	$20 \pm 3$	0,8
RANDOM	15,5	$15 \pm 1$	-

Из таблицы видно, что движение частицы вдоль оси сопровождается большим увеличением ширины спектрального распределения по сравнению со случаем плоскостной ориентации, что хорошо коррелирует с характерными энергиями излучения при каналировании для этих ориентаций. Для движения электронов вне оси или плоскости ширины экспериментального и расчетного спектров совпадают.

При уменьшении энергии электронов (тем более при использовании позитронов) число уровней и их ширина уменьшаются. Следовательно, в этом случае эффект "расщепления" должен наблюдаться в чистом виде.

В заключение необходимо отметить следующее:

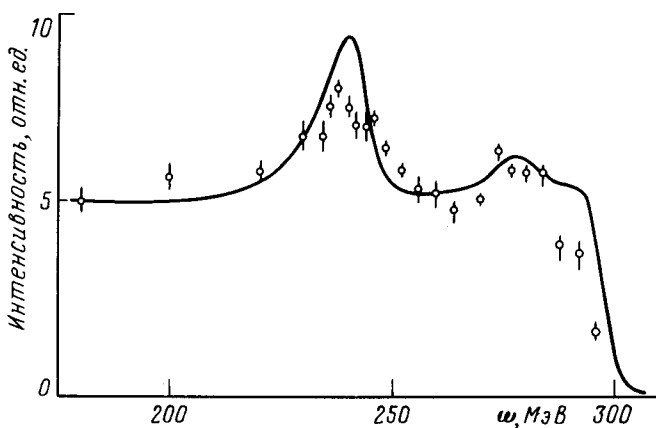


Рис.3. Спектр интенсивности КТИ типа *B* для условий плоскостного  $(11\bar{2})$  каналирования. Точки - эксперимент, линия - расчет

а) Процесс КТИ типа *B* может использоваться для генерации квазимонохроматических фотонных пучков, параметры которых могут быть рассчитаны с заданной точностью в случае, когда направление пучка электронов не совпадает с кристаллографическими направлениями.

б) Для количественного исследования эффекта "расщепления" необходимо использовать пучки электронов (позитронов) с  $E_0 \lesssim 100$  МэВ и разрешением спектротрической аппаратуры  $\Delta\omega \leq \omega_{\text{кан}}$ .

Авторы благодарны Ю.Л.Пивоварову за полезные обсуждения.

1. A.W.Saenz, H. Überall, Phys. Rev. B **25**, 4418 (1982).
2. N.Cue, T.C.Kimball, Phys. Lett. A **124**, 191 (1987).
3. A.S.Balayan et. al. Phys. Lett. A **159**, 433 (1991).
4. А.П.Потылицын, Письма в ЖЭТФ, **53**, 12 (1991).
5. В.Н.Забаев и др. Изв. ВУЗов. Физика, Томск, 1982.
6. И.Е.Внуков и др., Изв. ВУЗов. Физика **6**, 21 (1991).
7. М.А.Кумахов, Излучение каналированных частиц в кристаллах. М.: Энергоатомиздат, 1986.
8. А.В.Базылев, Н.К.Жеваго, Излучение быстрых частиц в веществе и во внешних полях. М.: Наука, 1987.
9. В.Н.Байер, В.М.Катков, В.М.Страховенко, Электромагнитные процессы при высокой энергии в ориентированных монокристаллах. Новосибирск: Наука, 1989.