



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2000-41

ОУ У-70

М.Д. Бавижев¹, Л.Ш. Докумова¹, Р.М. Гошонов¹,
Э.А. Меркер², В.В. Каплин³

**О ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИКИ
ПРОТОННЫХ ПУЧКОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ
С ПОМОЩЬЮ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
В МОНОКРИСТАЛЛАХ**

Направлено в *ЖТФ*

¹Черкесский государственный технологический институт, Черкесск

²Институт физики высоких энергий, Протвино

³Томский государственный политехнический университет, Томск

Аннотация

Бавижев М.Д. и др. О возможности диагностики протонных пучков высоких энергий с помощью параметрического рентгеновского излучения в монокристаллах: Препринт ИФВЭ 2000–41. – Протвино, 2000. – 5 с., 5 рис., библиогр.: 11.

Рассмотрена возможность использования для диагностики протонных пучков высокой энергии в ускорителях параметрического рентгеновского излучения, возникающего при их прохождении через монокристаллы.

Abstract

Bavizhev M.D et al. On Possibility of High Energy Proton Beams Detection with Parametric X-Ray Radiation in Monocrystals: IHEP Preprint 2000–41. – Protvino, 2000. – p. 5, figs. 5, refs.: 11.

It is shown that parametric (quasi-Cherenkov) X-ray radiation arising from high energy protons when passing through an orientated monocrystal can be used for beam instrumentation in the accelerator.

К настоящему времени успешно выполнено множество экспериментов по использованию эффекта каналирования релятивистских заряженных частиц в монокристаллах [1]. Особенно успешно кристаллооптические системы применяются в качестве дефлекторов частиц на основе изогнутых кристаллов для вывода и формирования пучков на современных ускорителях [2, 3]. Широкое применение монокристаллы получили также и для диагностики пучков.

В данной работе обсуждается методика диагностирования пучка, основанная на регистрации специфического излучения, возникающего при прохождении релятивистического протона через ориентированный монокристалл. Вследствие периодичности кристаллической структуры монокристалл может с успехом применяться в качестве радиатора монохроматического поляризованного и регулируемого по частоте параметрического рентгеновского излучения (ПРИ). Данное излучение является результатом дифракции псевдофотонов собственного поля релятивистского протона [4].

ПРИ релятивистских электронов впервые наблюдалось на кристалле алмаза Томской группой [5], затем такие исследования были проведены в Харькове [6] и Ереване [7]. К настоящему времени этот вид излучения исследован в области энергий электронов от 20 МэВ до 4,6 ГэВ и энергий генерируемых фотонов от единиц до сотен килоэлектронвольт. Подобные исследования для протонов не проводились. Вместе с тем перспективность ПРИ для получения пучков поляризованных рентгеновских фотонов существенно расширит круг возможных применений протонных ускорителей и накопителей. Важным здесь являются гораздо большие возможные углы Θ_γ испускания ПРИ, вплоть до $\Theta_\gamma = \pi/2$ относительно направления движения протонов по сравнению, например, с переходным излучением, где $\Theta_\gamma \approx \gamma^{-1}$.

Преимуществом протонов по сравнению с электронами является их существенно меньшее в долях характерного угла γ^{-1} рассеяние в кристалле, что позволяет получать высокоинтенсивное когерентное излучение на толстых кристаллах или использовать тонкие кристаллы, слабо возмущающие протонный пучок. Фотоны ПРИ испускаются вдоль направления движения частиц $\Theta_\gamma = \Theta_0$ (центральный рефлекс) и в направлении $\Theta_\gamma = 2\Theta_0$ (боковой рефлекс).

На рис.1 приведена геометрия углового распределения ПРИ, испускаемого в боковой дифракционный рефлекс. Плоскость рисунка совпадает с плоскостью, образованной векторами импульса протона и обратной решетки кристалла.

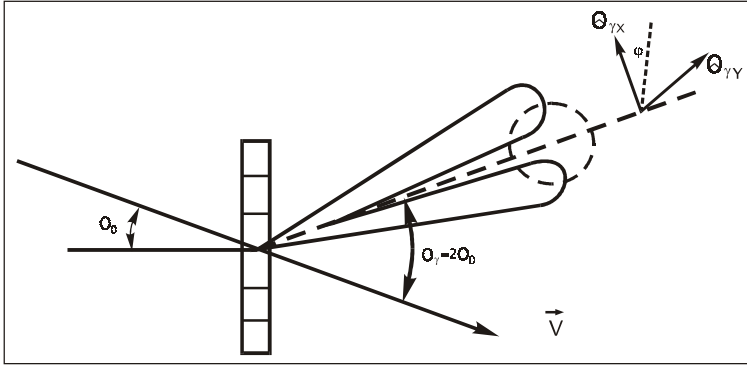


Рис. 1. Геометрия углового распределения рентгеновских фотонов в боковом дифракционном рефлексе ПРИ.

сти (110) кристалла кремния представлены на рис.2. $\Theta_{\gamma y}$ – угловые распределения имеют аналогичную форму. Видно, что интенсивность рефлекса ПРИ имеет узкий минимум в направлении $\Theta_{\gamma x} = \Theta_{\gamma y} = 0$. Угол максимальной интенсивности ПРИ в расчетных распределениях близок к величине эффективного угла испускания излучения, определяемого как $\Theta_{\phi} = (\gamma^{-2} + \omega_p^2/\omega^2 + \Theta_{2m})^{1/2}$, где Θ_m — среднеквадратичный угол многократного рассеяния протона в кристалле, ω_p и ω — соответственно плазменная частота вещества и частота излучения фотона.

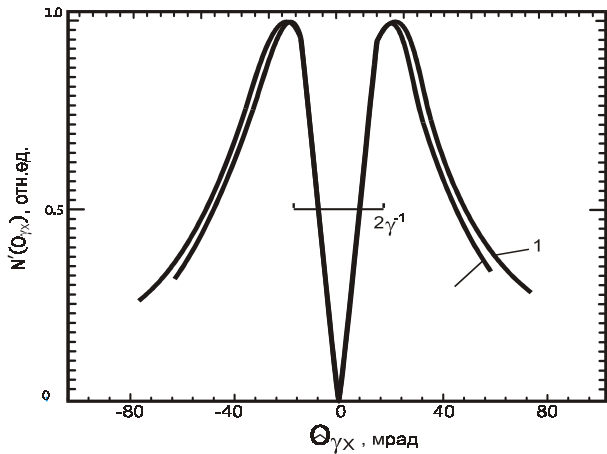


Рис. 2. Угловые распределения фотонов ПРИ в боковой рефлекс для кристалла кремния толщиной 1 мм. Энергия протонов 70 ГэВ (кривая 1 соответствует $\Theta_0 = 40^\circ$, кривая 2 — $\Theta_0 = 10^\circ$).

представляет собой острый пик в области энергии фотонов $E_\gamma = 5$ кэВ с относительной шириной на половине высоты $\Delta E_\gamma/E_\gamma \approx 6\%$ и значением спектральной плотности излучения в максимуме $\sim 6,3 \cdot 10^{-9}$ фот/р.эВ. В случае $Q_0 = 10^0$ спектр излучения представляет собой широкое двухвершинное распределение с центром в области $E_\gamma = 18,5$ кэВ, относительной шириной $\Delta E_\gamma/E_\gamma \approx 45\%$ и максимальной спектральной плотностью $\sim 3,7 \cdot 10^{-9}$ фот/р.эВ. Полные выходы фотонов при этом составляют соответственно $\sim 3,8 \cdot 10^{-6}$ фот/р. ($\Theta_0 = 40^\circ$) и $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ фот/р. ($\Theta_0 = 10^\circ$).

Экспериментальные исследования, результаты которых представлены в [8], показали, что степень линейной поляризации излучения для отдельных направлений может достигать 90%. Угловые и энергетические распределения ПРИ 70-ГэВ протонов в кристалле Si (110) толщиной 1 мм рассчитывались согласно теории [9]. Результаты расчетов $\Theta_{\gamma x}$ -распределений для $\Theta_0 = 40^\circ$ и 10° относительно плоскости

В нашем случае $\Theta_{\phi} \approx \gamma^{-1}$, так как величины ω_p^2/ω^2 и $\Theta_{2m} \ll \gamma^{-2}$, поэтому форма приведенных на рис.2 распределений слабо зависит от величины угла Θ_0 . Значения плотности излучения в максимуме составляют $\sim 1,2 \cdot 10^{-5}$ фот/р. стер и $\sim 3,8 \cdot 10^{-3}$ фот/р. стер соответственно для $\Theta_0 = 40^\circ$ и 10° .

На рис. 3 приведены рассчитанные нами в соответствии с теорией [9] полные спектры излучения протонов с энергиями 70 ГэВ в кристалле кремния при $\Theta_0 = 40^\circ$ (кривая 1) и $\Theta_0 = 10^\circ$ (кривая 2) относительно плоскости (110). В отличие от угловых распределений форма полных спектров ПРИ в боковом рефлексе существенно зависит от величины угла Θ_0 . При $\Theta_0 = 40^\circ$ спектральное распределение ПРИ

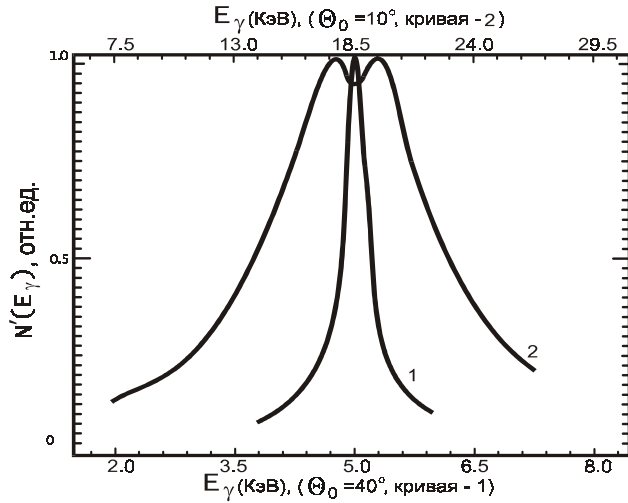


Рис. 3. Спектры фотонов ПРИ протонов с энергией 70 ГэВ в боковой рефлекс для кристалла кремния толщиной в 1 мм.

Из-за поглощения фотонов в веществе кристалла перспективнее использовать асимметричную геометрию облучения кристалла (см. рис.4), так называемый случай перехода Лауэ-Брэгга. Так, если 70-ГэВ протон движется внутри кристалла на расстоянии от его поверхности, меньшем длины поглощения фотонов, спектральная плотность излучения составит $\sim 6 \cdot 10^{-9}$ фот/р. эВ, при $\Theta_0 = 40^\circ$ и $\sim 3,5 \cdot 10^{-7}$ фот/р. эВ, при $\Theta_0 = 10^\circ$ на 1 мм пути.

Очевидно, что данная геометрия наиболее перспективна, так как она позволяет, используя периферийную часть протонного пучка, организовать дополнительный канал для работы с рентгеновским излучением. Учитывая малое поглощение фотонов в асимметричной геометрии по сравнению с геометрией Лауэ, возможно использовать более протяженные кристаллы для получения рентгеновского излучения с наибольшей интенсивностью. При несущественном поглощении фотонов темп роста спектральной, угловой и спектрально-угловой плотности ПРИ существенен пока среднеквадратичный угол многократного рассеяния $\Theta_m^2 \sim \gamma^{-2} + \omega_p^2/\omega^2$, дальнейшее увеличение длины кристалла приводит к эффективному увеличению ширины углового и спектрального распределений и, как следствие, к насыщению роста этих характеристик излучения.

С этой точки зрения, в случае протонов для генерации пучков ПРИ могут использоваться кристаллы в $(\gamma_e/\gamma_p)^2$ раз протяженнее, чем для электронов такой же энергии. Поэтому в качестве фактора, ограничивающего толщину используемого кристалла, в случае протонов, следует считать их ядерное взаимодействие и в качестве параметра, определяющего оптимальную длину кристалла, в этом случае выступает уже не L_R — радиационная, а $L_{Я}$ — ядерная длина. В нашем случае $L_{Я} = 30$ см и при $\Theta_0 \approx 10^\circ$ выход рентгеновских фотонов может достигать величины $\sim 10^{-2}$ фот/р.

При диагностике пучков релятивистских протонов с использованием ПРИ достаточно высокая интенсивность и направленность излучения позволяют применять кристаллы весьма малых размеров, практически не возмущающие анализируемый пучок. Перемещая тонкий кристалл в пучке и измеряя выход ПРИ, можно определить распределение интенсивности протонов по сечению пучка с разрешением, определяемым шириной кристалла,

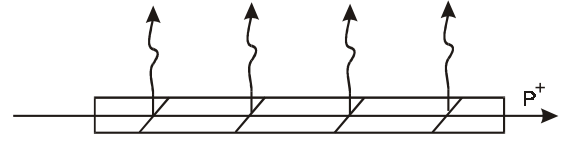


Рис. 4. Ассиметричная геометрия облучения кристалла при генерации ПРИ (переход Лауэ-Брэгга).

которая может быть задана вплоть до нескольких микрон. При этом удобством такого метода является простота и компактность устройства диагностики пучка, состоящего из гониометра с закрепленным кристаллом и детектора γ -квантов (рис.5).

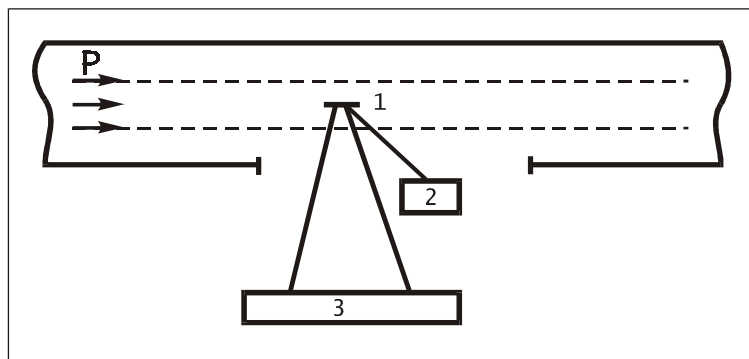


Рис. 5. Схема диагностики пучков релятивистских протонов на основе ПРИ. 1 — кристалл, 2 — гониометр, 3 — координатный детектор рентгеновского излучения.

Оценки показывают, что разрешение такого метода измерения угловой расходимости пучка может составлять величину $\sim 0,1 \cdot \gamma^{-1}$. Это, вероятно, не превышает возможностей метода, который может быть реализован, например, с использованием когерентного переходного излучения [10] в слоистой мишени, но простота изготовления и компактность кристаллического радиатора, высокая энергия фотонов и значительные углы излучения относительно направления движения протонов делают ПРИ более предпочтительным для такого рода измерений. Совместное измерение интенсивности части пучка при перемещении кристалла и углового распределения частиц этой фракции может быть использовано для измерения эммитанса пучка в определенном месте канала.

Точность измерения параметров протонного пучка и разрешение данного метода диагностики могут быть существенно улучшены за счет фокусировки [11] генерируемого рентгеновского излучения посредством изгиба кристалла. При этом многие принципы управления излучением, освоенные в рентгеновской дифракционной оптике, могут с успехом применяться и для формирования пучков ПРИ.

Список литературы

- [1] Бирюков В.М. и др. Управление пучками заряженных частиц высоких энергий при помощи изогнутых монокристаллов. // УФН. 1994, т. 164, 10, с.1017.
- [2] Асеев А.А., Бавижев М.Д. и др. – Препринт ИФВЭ 87-57. Серпухов, 1989.
- [3] Афонин А.Г., Бирюков В.М. и др. – Препринт ИФВЭ 98-15. Серпухов, 1998.
- [4] Барышевский В.Г. Канализование, излучение и реакции в кристаллах при высоких энергиях. Изд-во БГУ, Минск, 1982.
- [5] Воробьев С.А., Калипин Б.Н., Пак Сэн-Дэ и др. // Письма в ЖЭТФ. 1985. Т.41. С.3.
- [6] Адейшвили Д.И., Блажевич С.В. и др. // ДАН СССР. 1988, т.298. С.844.

- [7] Авакян Р.О., Аветисян А.Э., Адищев Ю.Н. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т.45, с.313.
- [8] Adishchev Yu.N., Verzilov V.A. et al. // Nucl.Instr. & Meth. B44, 1989, p.130.
- [9] Feranchuk J.D., Jvashin A.V. // J. de Phys. 1985. v.46, p.1981.
- [10] Piestrup M.A., Boyers D.G., Qiand Li. et al. // Nucl. Science. 1988, v.35, №1, p.464.
- [11] Воробьев С.А., Каплин В.В., Пак Сэн-Дэ. // А.с. 1302933 от 11.05.1985.

Рукопись поступила 2 октября 2000 г.

Бавижев М.Д. и др.

О возможности диагностики протонных пучков высоких энергий с помощью параметрического рентгеновского излучения в монокристаллах.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 10.10. 2000. Формат $60 \times 84/8$. Офсетная печать.
Печ.л. 0,62. Уч.-изд.л. 0,5. Тираж 120. Заказ 200. Индекс 3649.
ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

