

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА**

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
имени Д.В.СКОБЕЛЬЦЫНА**

**Д.А. Бакланов, И.Е.Внуков, В.К. Гришин, Ю.В. Жандармов, А.Н. Ермаков,
Г.П. Похил, Р.А.Шатохин**

**СТАТУС ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПОИСКУ И ИССЛЕДОВАНИЮ
ДИФРАГИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КАНАЛИРОВАННЫХ
ЭЛЕКТРОНОВ**

Препринт НИИЯФ МГУ № 2008-1/837

МОСКВА 2008

Д.А. Бакланов¹, И.Е. Внуков¹, В.К. Гришин^{*}, Ю.В. Жандармов¹,
А.Н. Ермаков^{*}, Г.П. Похил^{*}, Р.А. Шатохин¹

*- Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, Москва, Россия

1 - Белгородский государственный университет, Белгород, Россия

E-mail: grishin@depni.sinp.msu.ru

СТАТУС ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПОИСКУ И ИССЛЕДОВАНИЮ ДИФРАГИРОВАННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ КАНАЛИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Препринт НИИЯФ МГУ № 2008-1/837

Аннотация

Обсуждается возможность экспериментального обнаружения дифрагированного излучения каналированных электронов с энергией 15-40 МэВ на микротроне НИИЯФ МГУ. Предложен новый способ ориентации кристалла на электронных ускорителях средних энергий с коротким временем цикла ускорения и сброса электронов на мишень (микротрон, линейный ускоритель) по интегральным характеристикам выхода мягкого излучения из тонких металлических мишеней, обеспечивающий существенное сокращение временных затрат на ориентацию кристалла. Выполнен весь комплекс подготовительных работ (создана экспериментальная установка, написан пакет программ для работы с аппаратурой, проведены тестовые измерения) Это позволяет уже в ближайшее время проводить экспериментальные исследования характеристик излучения при взаимодействии быстрых электронов с упорядоченными средами, и, в частности, эксперименты по проверке влияния динамических эффектов на спектр каналированного излучения и поиску дифрагированного излучения каналированных электронов.

D.A.Baklanov, I.E.Vnukov, V.K.Grishin, Yu.V.Zhandarmov, A.N.Ermakov, G.P.Pokhil,
R.A.Shatokhin

EXPERIMENT STATUS ON RESEARCH OF DIFFRACTED RADIATION BY CHANNELLING
ELECTRONS

Preprint MSU SINP № 2008-1/837

Abstract

Experimental detection opportunity of diffracted radiation by channeling electrons with energy 15-40 МэВ for microtron conditions in Institute of Nuclear Physics of Moscow State University is discussed. The new way of a crystal orientation is offered for electron accelerators with short time of a cycle of acceleration and electrons dropping on a target (a microthrone, a linear accelerator) by means of integrated characteristics measuring of soft radiation yield from the thin metal targets, providing sufficiency reduction of orientation procedure in tens times. All complex of a preparation work is realized(it is created experimental installation, the necessary software package is written, test measurements are carried out). That allows to begin experimental researches in the near future of radiation characteristics at interaction of fast electrons with ordered media, in particular, experiments with influence checking of dynamic effects on a spectrum channelling radiations, and to search diffracted radiation.

© Д.А. Бакланов, И.Е. Внуков, В.К. Гришин, Ю.В. Жандармов,
А.Н. Ермаков, Г.П. Похил, Р.А. Шатохин, 2008

© НИИЯФ МГУ, 2008, <http://www.sinp.msu.ru>

1. Введение

Дифрагированное излучение каналированных электронов (Diffracted Channelling Radiation - DCR) или, как его иногда называют, дифрагированное излучение релятивистского осциллятора (ДИО) - одно из интересных физических явлений, происходящих при прохождении быстрых заряженных частиц через упорядоченные среды, предсказанных в 70-80-тых годах в работах В.Г. Барышевского с соавторами. Часть из них, например, параметрическое рентгеновское излучение (ПРИ) быстрых заряженных частиц в кристаллах и ПРИ под малыми углами к направлению скорости частицы в кристаллах, экспериментально зарегистрирована [1, 2].

ДИО, являющееся результатом когерентного суммирования двух процессов - излучения фотона и его дифракции в кристалле (см.[3] и цитированную там литературу), до последнего времени оставалось вне поля зрения экспериментаторов как вследствие недостаточной ясности в величине эффекта, так и очевидной сложности его выделения на фоне конкурирующих процессов: ПРИ и дифрагированного тормозного излучения (ДТИ). Дополнительную сложность с точки зрения возможности проведения исследований по поиску проявления этого эффекта представляет ограниченный диапазон энергии частиц, где возможно четкое проявление эффекта (7-40 МэВ), и очень узкий диапазон энергий фотонов, где оно может проявиться, что предъявляет жесткие требования к выбору угла наблюдения и коллимации излучения [4].

В последнее время, после появления цикла работ [4-7], ситуация с оценкой величины эффекта стала более ясной. В соответствии с результатами цитируемых работ в узком угловом интервале выход дифрагированного излучения каналированных электронов может на несколько порядков превышать выход ПРИ. В случае справедливости этой оценки можно надеяться на создание нового интенсивного источника рентгеновского излучения с перестраиваемой энергией, поскольку с практической точки зрения источник излучения на основе механизма ПРИ в совершенных кристаллах себя не оправдал [8]. Весьма интересным выглядит и утверждение авторов [3] о возможности интерференции механизмов излучения при каналировании и ПРИ. В этом случае при выполнении условий дифракции для фотонов, испущенных при переходе электрона из одного связанного состояния в другое, можно ожидать изменения соотношения пиков в спектре излучения при каналировании. Поскольку интерференция когерентного тормозного излучения и излучения при каналировании наблюдалась экспериментально [9,10], регистрация эффекта интерференции механизмов излучения при каналировании и ПРИ является интересной физической задачей. Исходя из вышеизложенного, экспериментальные исследования, направленные на верификацию теоретических предсказаний о величине и характеристиках ДИО, бесспорно важны и актуальны.

2. Постановка задачи

С методической точки зрения наиболее привлекательным представляется диапазон энергий фотонов 20-35 кэВ. Он может быть реализован на ускорителях с энергией 20-40 МэВ. Из-за низкого поглощения фотонов этих энергий в воздухе эксперимент можно провести без вакуумирования фотонной трассы, а детектор отнести на большое расстояние от ускорителя для уменьшения фона. Эксперимент предполагается провести на разрезном микротроне НИИЯФ МГУ [11] с током ~ 3 мА ($\sim 10^{11}$ частиц за цикл ускорения), частотой 10 Гц, длительностью цикла излучения $\tau \sim 8 - 10 \mu\text{с}$ и эмитансом $\approx 1 \text{мм} \times \text{мрад}$. Наличие выведенного электронного пучка, требуемый энергетический диапазон (14.6-67.4 МэВ) и возможность изменения энергии частиц позволяют надеяться на успешное выделение этого типа излучения на фоне ПРИ и ДТИ.

Исходя из условий простоты эксперимента, плоскость каналирования должна совпадать с горизонтальной, а плоскость, на которой происходит дифракция излучения при каналировании, развернута вокруг вертикальной оси на требуемый угол. Для регистрации искомого излучения предполагается использовать рентгеновские NaI детекторы (как показывает практика, для энергий фотонов больше 20 кэВ их разрешения вполне достаточно).

Для уверенного выделения искомого эффекта предполагается провести измерения угловых распределений выхода рентгеновского излучения. В соответствии с теоретическими предсказаниями [4-7], угловое распределение ДИО уже распределения ПРИ. Контрольной проверкой может быть проведение таких же измерений для другой энергии электронов. Все условия для генерации ПРИ и ДТИ изменятся слабо, тогда как совпадения энергий излучения при каналировании и дифрагированных фотонов, требуемого для реализации искомого эффекта, не будет.

Для наблюдения эффекта необходимо сориентировать плоскость кристалла вдоль направления электронного пучка, то есть выйти на режим плоскостного каналирования. Методы ориентации кристаллов по выходу излучения при каналировании с помощью ионизационной камеры [12] или NaI(Tl) детектора в комптоновской геометрии [13], обычно используемые на ускорителях для более высоких энергий, для электронов с энергией несколько десятков МэВ не пригодны, поскольку характерная энергия излучения при каналировании таких частиц не превышает 50- 100 кэВ.

Использование счетного режима работы детекторов, обычно применяемое на ускорителях низких и средних энергий (см., например, [14] и цитируемую там литературу), на ускорителях с коротким временем цикла ускорения практически невозможно, так как типичная длительность импульса с детектора излучения ($\sim 1-6 \mu\text{с}$), в зависимости от типа используемого детектора, сопоставима с длительностью цикла ускорения (6-10 $\mu\text{с}$). В связи с этим для исключения наложений ток ускорителя должен поддерживаться таким, что бы за один цикл ускорения регистрировалось в среднем не более 0.2-0.4 импульсов. Для получения статистической ошибки на уровне 5% при частоте ускорителя 10 Гц необходимо не менее 100 - 200 секунд для каждой ориентации кристалла. В процессе ориентации кристалла обычно измеряется несколько ориентационных зависимостей с числом точек от 100 до 200. Другими словами ориентация кристалла требует 10-20 часов непрерывной работы ускорителя, что в наших условиях практически не осуществимо. Ориентация по спектрам излучения требует увеличения временных затрат как минимум в несколько раз и поэтому так же не может быть использована на этапе первоначальной ориентации кристалла. Следует отметить, что в процессе ориентации необходимо измерять токи на уровне $10^3 - 10^5$ частиц за цикл ускорения, что представляет собой отдельную техническую задачу.

Традиционный метод ориентации кристалла с помощью тонкостенной и толстостенной ионизационных камер [12], где используется интегральный режим работы детекторов, в наших условиях заведомо не пригоден вследствие низкой энергии излучения при каналировании электронов средних энергий. Поэтому для ориентации кристалла предполагается использовать рентгеновский NaI детектор толщиной 1 мм, расположенный под углом 90° и регистрирующий изменение выхода характеристического рентгеновского излучения (ХРИ) из тонкой металлической мишени, установленной на γ -пучке, в зависимости от ориентации кристалла. Такой метод ориентации в счетном режиме использовался в условиях ускорительного зала томского синхротрона для энергии электронов 500 МэВ и показал хорошую чувствительность [15]. Путем замены рассеивателя можно добиться оптимального соотношения сигнал/фон и выделить изменение интенсивности той или иной линии в спектре регистрируемого излучения (см. следующий раздел). Измерения предполагается проводить в токовом режиме включения детектора. Это позволит работать в обычном для

ускорителя режиме и почти на порядок сократить время ориентации кристалла.

3. Моделирование

Для проверки применимости предлагаемого метода ориентации кристалла для меньших энергий электронов, чем в эксперименте [15], было проведено моделирование зависимости интегрального отклика детектора, то есть энергии поглощенной в детекторе, от спектра анализируемого излучения, материала и толщины мишени. Расстояние от металлической мишени до детектора 1 м. Угол коллимации рассеянного излучения 2° . В процессе моделирования учитывалось поглощение первичного и рассеянного излучения в материале мишени и в воздухе на пути от мишени до детектора и эффективность детектора. Тормозное излучение вторичных частиц не учитывалось.

Для сопоставления были использованы результаты эксперимента [16] по исследованию излучения при плоскостном (110) каналировании электронов с энергией 30 МэВ в кристалле кремния толщиной $15 \mu\text{м}$. На рисунке 1 приведены начальные участки спектров излучения, использованные при моделировании. Модельный спектр излучения при каналировании (кривая 1) воспроизводит экспериментальный спектр [16] с погрешностью не более 30%. Тормозной спектр (кривая 2) рассчитан, исходя из спектрально-углового распределения Шиффа [17] учетом параметров цитируемого эксперимента: начальной расходимости пучка электронов, многократного рассеяния частиц в кристалле и угла коллимации излучения (0.5 мрад). Полное число фотонов в спектре излучения при каналировании на 25–30% выше, чем в спектре тормозного излучения из разориентированного кристалла. В соответствии с результатами расчета основной вклад в выход регистрируемого излучения дает процесс фотопоглощения квантов первичного пучка в мишени. Вклад фотонов, испытавших в мишени когерентное и некогерентное рассеяние, для всех мишеней не превышал долей процента, что обусловлено как малым значением сечения, так и низкой эффективностью детектора для энергий фотонов $\omega > 100 \text{ кэВ}$.

Расчет выполнен для мишеней из свинца, олова, серебра, молибдена, ниобия и меди, то есть для тех распространенных металлов, из которых можно изготовить тонкие фольги. На рисунке 2 приведена зависимость отклика прибора от толщины мишени для нескольких материалов и разных спектров излучения. Верхние кривые соответствуют регистрации излучения при каналировании, а нижние тормозного излучения. Как видно из рисунка, вещества с большим Z обеспечивают больший отклик из-за большей энергии фотонов ХРИ. В то же время различие величины отклика для спектров излучения при каналировании и тормозного излучения, наиболее важное с точки зрения эффективности развиваемого метода ориентации кристаллов, максимально для веществ с средним Z (олово, серебро, см. рис. 3). Следует отметить, что выход регистрируемого излучения практически выходит на насыщение для толщин мишеней $40\text{--}70 \mu\text{м}$, что обусловлено большим сечением фотопоглощения в области интересующих нас энергий.

На рисунке 3 приведена зависимость отношения выходов регистрируемого излучения для спектров излучения при каналировании и тормозного излучения и мишеней из свинца, олова, серебра, ниобия и меди. Из рисунка видно, что лучшими мишенями для реализации предлагаемого метода ориентации кристаллов по интегральному выходу рассеянного излучения являются серебро и олово. Медь и свинец проигрывают из-за меньшей величины превышения и малой величины отклика (медь). Для мишеней оптимальной толщины отношение регистрируемых выходов рассеянного излучения для анализируемых спектров ($\sim 2.4\text{--}1.7$) существенно лучше, чем отношение числа фотонов в этих спектрах ~ 1.3 .

Достаточно высокая чувствительность предлагаемого метода и пороговый характер зависимости сечения фотопоглощения от энергии фотонов позволяет осуществить про-

верку существования интерференции механизмов ПРИ и излучения при каналировании в случае выполнения условий дифракции для фотонов того или иного пика в спектре излучения (см. введение и [3]) не проводя трудоемких спектральных измерений. Возьмем для определенности кристалл кремния с ориентацией $\langle 111 \rangle$, где плоскость (110) совпадает с горизонтальной, а (112) с вертикальной, и энергию электронов 30 МэВ. В соответствии с [16] (см. рис. 1) в спектре излучения при плоскостном (110) каналировании электронов с $E_e=30$ МэВ в кремнии наблюдаются четыре ярко выраженных пика с энергиями 45 кэВ, 29.2 кэВ, 19.7 кэВ и 13.6 кэВ.

Для ориентации $\langle 111 \rangle$ и выбранной геометрии наиболее сильное отражение должно наблюдаться на плоскости (112) (отражение (224)) и двух плоскостях типа (110) (отражение (220)), развернутых относительно вертикальной плоскости на углы $\pm 30^\circ$, см. например, [2]. Дифракция на плоскостях типа (112), развернутых на угол $\pm 60^\circ$ относительно вертикальной плоскости, должна наблюдаться для больших углов разориентации оси и поэтому не рассматривается. Если искомый эффект существует, то в спектрах излучения при плоскостном (110) каналировании должны наблюдаться особенности для углов разориентации оси кристалла вдоль плоскости (110) $\Theta=82.9$ мрад и 124.6 мрад ($\omega=45$ кэВ), $\Theta=127.9$ мрад и 192.2 мрад ($\omega=29.2$ кэВ), $\Theta=192$ мрад и 287.8 мрад ($\omega=19.7$ кэВ), $\Theta=277$ мрад и 424.6 мрад ($\omega=13.6$ кэВ). Первое значение угла разориентации соответствует выполнению брэгговского условия для фотонов этих энергий на плоскостях (110), а второе на плоскости (112). Другими словами в случае интерференции этих механизмов излучения в процессе измерения ориентационной зависимости выхода рассеянного излучения для этих углов разориентации оси выход регистрируемого излучения должен изменяться.

Порог фотопоглощения на К оболочке для олова - 29.2 кэВ, для серебра - 25.51 кэВ, для ниобия - 18.99 кэВ, а для меди - 8.98 кэВ, поэтому при измерении ориентационных зависимостей с использованием тонких фольг из этих материалов изменение спектров, обусловленное выполнением условия дифракции будет проявляться по разному. Например, тонкая мишень из ниобия должна обладать наибольшей чувствительностью к изменению интенсивности пика с $\omega=19.7$ кэВ для углов ориентации Θ порядка 190–300 мрад, тогда как для мишеней из олова или серебра изменение интенсивности этого пика не скажется на выход регистрируемого излучения.

С увеличением толщины кристалла и угла коллимации излучения соотношение интенсивностей каналированной и тормозной компонент излучения уменьшается. Тем не менее, для толщины кристалла 0.2 мм и того же угла коллимации (0.5 мрад) в предположении, что каналирование происходит только в приповерхностном слое кристалла толщиной меньше 0.015 мм, отношение выходов регистрируемого излучения для спектра излучения при каналировании и тормозного излучения остается $\sim 1.1-1.2$ что позволяет надеяться на успешную регистрацию искомого эффекта и при изменении толщины кристалла или угла коллимации излучения.

4. Экспериментальная методика и предварительные результаты

Схема предполагаемого эксперимента приведена на рисунке 4. Электроны с пятой или шестой орбиты микротрона ($E_e=25.2$ МэВ или 30 МэВ) выводятся в камеру рассеяния, где расположен трех-осевой гониометр с установленным на нем кристаллом и есть несколько окон для вывода излучения. Рабочий диапазон углов вращения кристалла вокруг горизонтальной и вертикальной оси Θ_v и $\Theta_h - \pm 5^\circ$ с шагом вращения 0.01° . Диапазон углов вращения вокруг оси электронного пучка $\varphi - \pm 5^\circ$ с шагом 0.04° . Для вращения гониометра используется предложенная в [18] схема управления шаговыми двигателями через ЛРТ порт компьютера. Размер электронного пучка на выходе из ускорителя 3×7 мм² соответ-

ствуется расходимости ~ 0.2 мрад [11], что вполне достаточно для планируемых измерений.

Выведенный электронный пучок измеряется магнитоиндукционным датчиком в режиме большого тока, либо монитором вторичной эмиссии в режиме спектральных измерений. Провзаимодействовавшие электроны отворачиваются в могильник очистным магнитом. Там же может быть установлен цилиндр Фарадея для калибровки датчика вторичной эмиссии. Основная проблема, которую предстоит решить, состоит в том, что до последнего времени ускоритель использовался для проведения исследований сечений ядерных реакций, где нет особой необходимости в точном измерении тока в каждом цикле ускорения и отсутствуют датчики для измерения малых токов. Эта часть аппаратуры в настоящее время разрабатывается и, частично, настраивается.

Основной задачей первого этапа измерений была проверка развиваемого метода ориентации кристаллов на ускорителях средних энергий с коротким циклом ускорения по интегральному выходу рассеянного под прямым углом излучения из мишени, установленной на пучке γ -излучения из кристалла. Из-за отсутствия камеры рассеяния эксперимент выполнен на воздухе и без поворота прошедших через кристалл электронов. Пучок электронов с энергией 30 МэВ из микротрона проходил титановую фольгу толщиной 0.05 мм и падал на установленный в гониометре кристалл кремния толщиной 0.23 мм, находящийся на расстоянии $\sim 10-15$ см от выходного фланца. Наличие фольги и слоя воздуха перед кристаллом увеличивает расходимость пучка с $\vartheta_e \sim 1$ мрад до ~ 20 мрад.

В эксперименте исследовалась зависимость показаний рентгеновского NaI(Tl) детектора, регистрирующего рассеянное γ -излучения из тонкой металлической мишени, от материала мишени и ориентации кристалла. На рисунке 5 приведены сглаженные спектры излучения для мишени из ниобия, измеренные детектором за одинаковое время (5 мин.). Спектр излучения измерялся только в течение цикла ускорения (см. рис. 6а), что позволило существенно уменьшить вклад фона, обусловленного наведенной активностью в зале микротрона. Из рисунка видно, что наряду с уверенным пиком ХРИ ниобия ($\omega \approx 16.6$ кэВ) присутствует излучение с энергией $\omega \sim 70-100$ кэВ, причем выход этого излучения с мишенью и без мишени примерно одинаков. Наличие "ложных" пиков в спектрах обусловлено низкой статистикой (полное число событий $\sim 300-400$). Перекрытие трассы рассеянного излучения свинцовой пластиной толщиной 1 мм добавило фотоны ХРИ свинца ($\omega \sim 70$ кэВ) и практически полностью "срезало" это излучение, что подтвердило, что оно идет непосредственно с участка трассы тормозного пучка, просматриваемого детектором. Наиболее вероятно, что появление таких амплитуд в регистрируемом спектре обусловлено когерентным и некогерентным рассеянием фотонов пучка γ -излучения из кристалла в воздухе. Можно надеяться, что использование "разнесенного" коллиматора уменьшит область просматриваемого участка воздуха и увеличит долю фотонов ХРИ.

При выходе на режим спектральных измерений путем уменьшения тока накала катода электронной пушки, ток ускорителя снижался с 5 мА (мощность дозы ~ 20 Зв/час) до ~ 0.5 μ А (мощность дозы $\sim 2-3$ μ Зв/час), что обеспечило загрузку детектора ~ 1 Гц, при частоте ускорителя 10 Гц. В качестве примера такого режима работы ускорителя на рисунке 6а приведена осциллограмма выходного сигнала с детектора (зависимость 1), измеренная за несколько десятков циклов ускорения. Здесь и на следующих рисунках зависимость 2 - огибающая ускоряющего ВЧ поля. Из рисунка видно, что в этом режиме наложение сигналов в детекторе в течении одного цикла ускорения отсутствует, а сами импульсы возникают только в момент цикла ускорения.

Как отмечено выше, спектрометрический и счетный режим работы детектирующей аппаратуры не может использоваться для ориентации кристалла в первую очередь из-за больших временных затрат. С увеличением тока число фотонов, попадающих в детектор резко возрастает, а на выходе детектора наблюдается широкий импульс, обусловленный

наложением сигналов от разных фотонов и их интегрированием на выходном сопротивлении (рис. 6б). Для обеспечения интегрального режима съема информации с детектора разработано устройство, синхронизированное с циклом ускорения и интегрирующее этот сигнал (рис. 6г). После окончания цикла ускорения в нем формируется импульс управления АЦП (рис. 6в), выполненного в стандарте КАМАК и подключенного к интегратору.

Измерения показали, что ток микротрона неконтролируемо меняется в пределах 20-30%. Поскольку ожидаемое изменение выхода излучения в зависимости от ориентации кристалла такого же порядка, необходимо измерять ток во время каждого цикла ускорения с погрешностью не хуже долей процента. Для этого использовался детектор NaI(Tl) большего размера, также включенный в интегральном режиме и регистрирующий обратно рассеянное излучение из могильника, куда направлялось рожденное в кристалле тормозное излучение. Известно, что обратно рассеянное излучение в основном формируется за счет перерассеяния фотонов с энергией больше нескольких МэВ, поэтому для энергии электронов $E_e=30$ МэВ его интенсивность не должна зависеть от ориентации кристалла.

На рисунке 7 приведена зависимость амплитуд сигналов, зарегистрированных каждым детектором, и их отношение для неизменной ориентации кристалла. Из рисунка видно, что спонтанные колебания тока ускорителя приводят к изменению амплитуд регистрируемых сигналов на 30-40%, тогда как изменение отношения амплитуд не превышает $\pm 1\%$. Исходя из ожидаемого выхода параметрического рентгеновского излучения $\sim 10^{-7} - 10^{-8}$ фотон/электрон, в процессе измерений угловых распределений и ориентационных зависимостей выхода ПРИ для относительного мониторинга может быть использован этот же способ измерения тока микротрона. Для измерений спектров излучения при каналировании его чувствительности будет уже не достаточно.

Разработанный комплекс экспериментальной аппаратуры позволил провести измерения ориентационных зависимостей выхода рассеянного излучения от ориентации кристалла. На рисунке 8 приведена одна из ориентационных зависимостей (ОЗ), измеренная с шагом 0.02 градуса. На пучке излучения установлена мишень из олова размерами 80×15 мм² и толщиной 60 μ м. Расстояние между кристаллом и мишенью 2 м. Ось кристалла совпадает с направлением пучка электронов с погрешностью не хуже 3-5 градусов. Каждая точка ОЗ соответствует 20 циклам ускорения (2 секунды). Полное число точек - 1000, время измерения - 37 минут. Такое же число точек с измерением счета фотонов или спектров излучения и статистической ошибкой на уровне 5% заняло бы несколько суток.

Из рисунка видно, что при изменении угла поворота кристалла выход рассеянного излучения плавно возрастает, достигает максимума и затем начинает спадать. Однако, ожидаемые узкие пики, связанные с излучением при плоскостном каналировании электронов в кремнии, отсутствовали. Наиболее вероятно, что отсутствие плоскостных пиков обусловлено двумя причинами. Во-первых, из-за наличия фольги на выходном фланце и слоя воздуха перед кристаллом расходимость электронного пучка $\vartheta_e \sim 20$ мрад больше угла плоскостного каналирования $\psi_c \sim 1$ мрад. Во-вторых, большим вкладом фотонов, рассеянных на воздухе. Как уже отмечалось при обсуждении результатов измерений спектров рассеянного излучения, размеры просматриваемого детектором участка трассы пучка излучения намного больше размеров металлической мишени, поэтому вклад фотонов ХРИ, с которым связана ожидаемая регистрация излучения при каналировании, слишком мал.

Зарегистрированная зависимость показаний детектора от ориентации кристалла обусловлена увеличением выхода фотонов когерентного тормозного излучения (КТИ) [19] при уменьшении угла между направлениями кристаллографической оси и пучка электронов. Для энергии электронов $E_e=30$ МэВ в зависимости от угла между кристаллографическими плоскостями и импульсом электрона их энергия может меняться от нескольких сотен кэВ до единиц МэВ, то есть находиться в том диапазоне энергий, для которого вклад

фотонов, рассеянных на воздухе и попавших в детектор, достаточно велик. Тем не менее, при использовании достаточно простых мер вклад воздуха в показания детектора можно уменьшить как минимум на порядок. В этом случае можно будет уверенно регистрировать пики, связанные с излучением при каналировании.

5. Заключение

Наличие необходимого минимума требуемой аппаратуры, проведённые оценки и тестовые измерения позволяют надеяться на успешное выполнение предлагаемых исследований после изготовления и установки подключенной к вакуумной системе ускорителя камеры рассеяния. На этом этапе будет окончательно проверен предлагаемый метод ориентации кристалла по выходу рассеянного излучения, проведен поиск влияния выполнения условий дифракции на выход излучения при каналировании и измерение угловых и ориентационных зависимостей выхода ПРИ при выполнении условий каналирования. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 05-02-17648 и 08-02-00816а) и программы внутренних грантов БелГУ.

6. Литература

1. Воробьев С.А., Калинин Б.Н., Пак С., Потылицын А.П. Обнаружение монохроматического рентгеновского излучения при взаимодействии релятивистских электронов с монокристаллом алмаза. Письма ЖЭТФ, т. 41, вып. 1, 1985, с.3-6.
2. Алейник А.Н., Балдин А.Н., Богомазова Е.А., Внуков И.Е., Калинин Б.Н., Кубанкин А.С., Насонов Н.Н., Науменко Г.А., Потылицын А.П., Шарафутдинов А.Ф. Экспериментальное обнаружение параметрического рентгеновского излучения вдоль скорости релятивистских электронов, движущихся в кристалле вольфрама. Письма в ЖЭТФ. - 2004. - Т.80. - Вып.6. - С.447-451.
3. Барышевский В.Г., Дубовская И.Я. Итоги науки и техники. Сер. Пучки заряженных частиц и твердое тело. М.: ВИНТИ, т. 4. 1991, С. 129-225.
4. Богданов О.В., Коротченко К.Б., Пивоваров Ю.Л. Угловое распределение дифрагированного рентгеновского излучения при (111) каналировании электронов в Si: влияние зонной структуры энергетических уровней. Письма в ЖЭТФ, Т.85, вып. 11, С.684-688.
5. Ikeda T., Matsuda Y., Nitta H. and Ohtsuki Y.H. Parametric X-ray radiation by relativistic channeled particles. Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B. 1996. v. 115. p.380.
6. Matsuda Y., Ikeda T., Nitta H. and Ohtsuki Y.H. Numerical calculation of parametric X-ray radiation by relativistic electrons channeled in a Si crystal. Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B. 1996. v. 115. p.396.
7. Yabuki R., Nitta H., Ikeda T. and Ohtsuki Y.H. Theory of diffracted channeling radiation. Phys. Rev. B, v.63 (2001), 174112.
8. Балдин А.Н., Внуков И.Е., Шатохин Р.А. Использование мозаичных кристаллов для генерации интенсивных пучков рентгеновского излучения. Письма ЖТФ., 2007. Т.33, вып.14, С.87-94.
9. Andersen J.U. and Laesgaard E. Coherent bremsstrahlung and sidebands for channeled electrons. Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. B, 1988, v.33, P.11-17.
10. Амосов К.Ю., Внуков И.Е., Калинин Б.Н. и др. Влияние эффекта каналирования ультрарелятивистских электронов на спектр когерентного тормозного излучения типа Б. Письма в ЖЭТФ, 1992, т.55, вып.8, стр.587-590.
11. Shvedunov V.I., Ermakov A.N., Karev A.I., Knapp E.A., Sobenin N.P. and Trower W.P. 70 MeV electron racetrack microtrone commissioning. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, p.2596.

12. Lackey D., Scwitters R.F. Methods of crystal alignment for the production of coherent bremsstrahlung. Nucl. Instrum. and Meth. 1970, v. 81, p.164-172.
13. Калинин Б.Н., Коновалова Е.И., Плешков Г.А. и др. Автоматизированная система ориентирования монокристаллических мишеней в электронном ускорителе. ПТЭ, 1985, № 3, с.31-35.
14. Berman B.L Channelling radiation: A historical perspective. H. Wiedemann (ed.) Electron-Photon Interaction in Dense Media, NATO Science Series, II Mathematics, Physics and Chemistry - Vol. 49, p.7-24. 2002 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.
15. Балдин А.Н., Внуков И.Е., Нечаенко Д.А., Шатохин Р.А. Влияние мозаичности кристаллов на характеристики параметрического рентгеновского излучения. Вестник Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина, 2006, Т. 744, серия физическая, "Ядра, частицы, поля", вып.3(31), С.51-65.
16. Gary C.K., Fisher A.S., Pantell R.H., Harries J., Piestrup M.A. Channeling of electrons in Si produces intense quasimonochromatic, tunable, picosecond x-ray bursts. Phys. Rev. B, V. 42, No. 1 (1990), P.7-14.
17. Schiff L.I. Energy -angle distribution of thin target bremsstrahlung, Phys. Rev., 1951, v.83, p.252-257.
18. Шатохин Р.А. Драйвер управления униполярным шаговым двигателем от ЛРТ порта с автоматическим переходом на ток удержания. Схемотехника (2207) No.6, С.45-47.
19. Тер-Микаэлян М.Л. Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях, Изд. АН АРМ ССР, Ереван, 1969, 459.

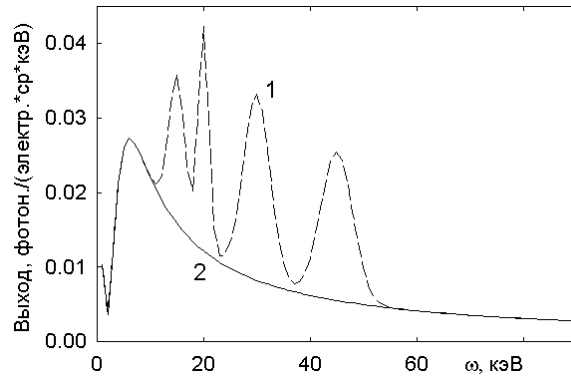


Рис. 1: Спектры излучения электронов с $E_e=30$ МэВ в кристалле кремния для условий эксперимента [16]: 1 - излучение при плоскостном (110) каналировании; 2 - тормозное излучение.

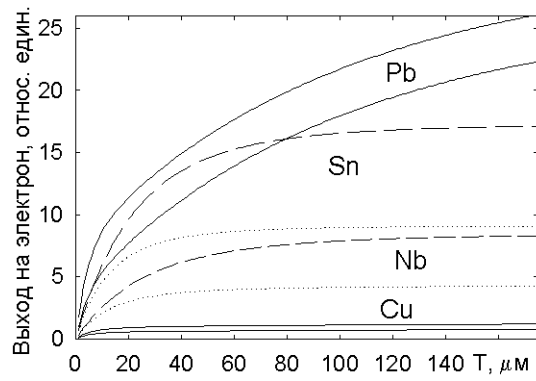


Рис. 2: Зависимость отклика детектора рассеянного излучения от спектра излучения, падающего на мишень, её материала и толщины.

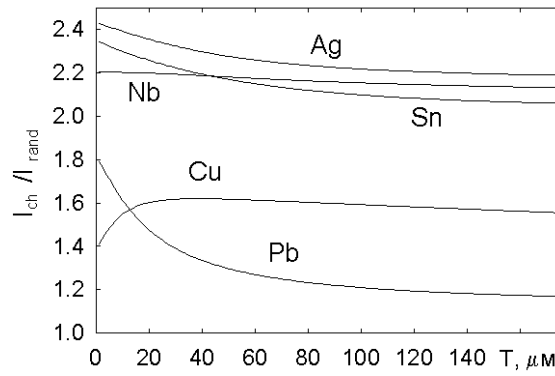


Рис. 3: Зависимость отношения отклика детектора к излучению разного спектрального состава от материала и толщины металлической мишени.

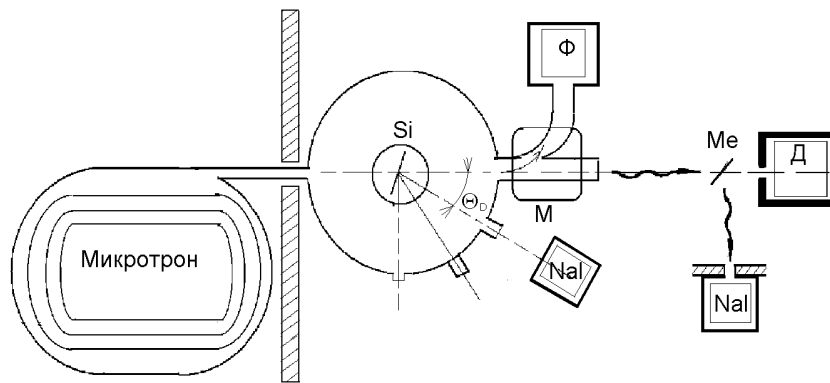


Рис. 4: Схема расположения экспериментальной аппаратуры. М - очистной магнит; Ф - цилиндр фарадея; Me - металлическая пластина; Д - дозиметр; Si - кристалл кремния, установленный в гониометре.

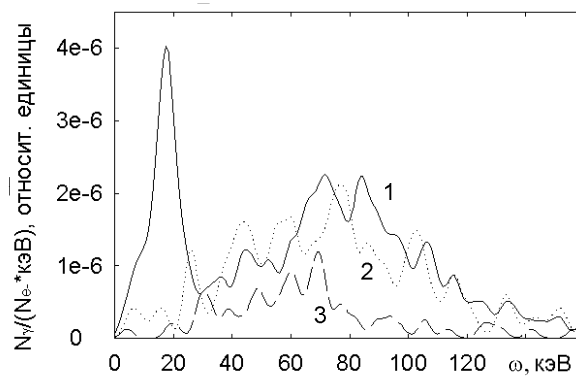


Рис. 5: Спектры излучения для мишени из ниобия: 1 - спектр с мишенью, 2 - спектр без мишени, 3 - трасса рассеянного излучения перекрыта свинцом толщиной 1 мм.

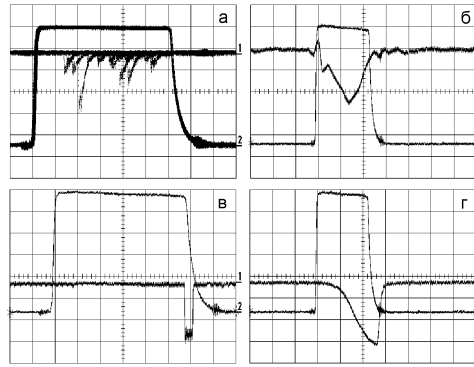


Рис. 6: Осциллограммы импульсов с рентгеновского детектора: а) Временное распределение импульсов с детектора в режиме спектральных измерений ($I \sim 1-3 \mu\text{A}$) за несколько циклов ускорения; б) Сигнал с детектора в режиме большого тока ($I \sim 1-3 \text{mA}$); в) Временное положение импульса управления АЦП; г) Импульс после интегратора.

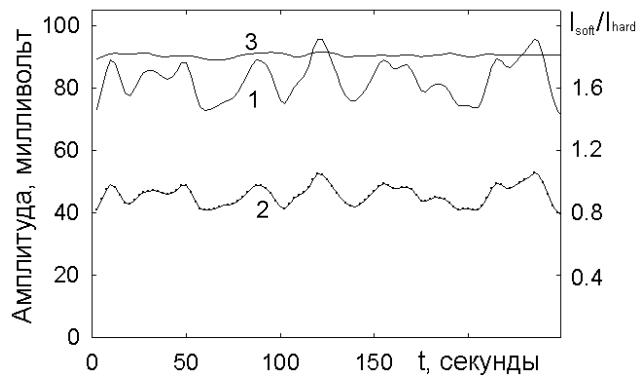


Рис. 7: Зависимость амплитуды сигналов с рентгеновского и "фонового" детекторов от времени и их отношение, соответственно, зависимости 1-3.

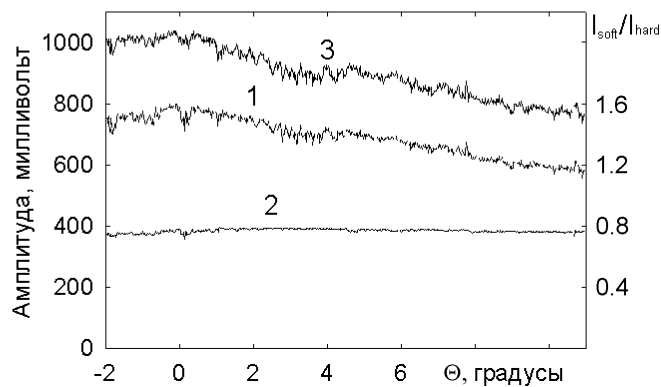


Рис. 8: Ориентационная зависимость выхода излучения для энергии электронов 30 МэВ и кристалла кремния: 1 - показания детектора рассеянного излучения; 2 - показания детектора "фонового" излучения; 3 - Отношение показаний детекторов.

Дмитрий Александрович Бакланов

Игорь Евгеньевич Внуков

Владислав Константинович Гришин

Юрий Валерьевич Жандармов

Андрей Николаевич Ермаков

Григорий Павлович Похил

Роман Александрович Шатохин

**СТАТУС ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПОИСКУ И ИССЛЕДОВАНИЮ
ДИФРАГИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КАНАЛИРОВАННЫХ
ЭЛЕКТРОНОВ**

Препринт НИИЯФ МГУ № 2008-1/837

Работа поступила в ОНТИ 11.03.2008.