



УДК 539.2

**ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК КРИСТАЛЛОВ БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ
С ПОМОЩЬЮ ИЗЛУЧЕНИЯ В НИХ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ****Д.А. Бакланов, И.Е. Внуков, Ю.В. Жандармов,
С.А. Лактионова, Р.А. Шагохин**Белгородский государственный университет,
ул. Победы, 85, Белгород, 308015, Россия, e-mail: vnukov@bsu.edu.ru

Аннотация. Анализируется зависимость характеристик излучения, возникающего при прохождении через кристалл быстрых электронов, в зависимости от качества внутренней структуры образца. Обсуждаются способы измерения мозаичности кристаллов, размеров микроблоков и посторонних включений по характеристикам регистрируемого излучения.

Ключевые слова: быстрый электрон, кристалл, мозаичность, выход излучения, каналирование, микроструктура, микроблок, эксперимент.

1. Введение

Наличие упорядоченности расположения атомов в конденсированном веществе приводит к появлению ориентационных и интерференционных эффектов в выходе вторичных процессов, возникающих при прохождении через него быстрых заряженных частиц. К ним, в частности, относятся процессы рассеяния, ионизационных потерь энергии частиц, выхода ядерных реакций, процессы генерации излучения и ряд других. Наличие связи между внутренней структурой мишени и выходом вторичных процессов позволяет ставить вопрос об анализе внутренней структуры мишени по результатам измерений. Например, по выходу рассеянных назад каналированных ионов можно судить о расположении примесей в кристаллической решётке, а по спектрам излучения при каналировании быстрых электронов можно уточнять форму потенциала, плотность электронов, амплитуду тепловых колебаний атомов решетки и тому подобное, см., например, [1,2] и цитируемую там литературу.

В этом же ряду стоит и задача анализа качества внутренней структуры кристаллических образцов, то есть определения наличия в них посторонних включений и блоков мозаичности, распределения микроблоков по углу разориентации относительно основного направления и размерам по характеристикам жесткого электромагнитного излучения, генерируемого при прохождении через них быстрых электронов. К достоинствам этого подхода можно отнести высокую проникающую способность такого излучения и наглядность интерпретации.

В наиболее отчетливой форме эти преимущества реализуются в случае анализа микроструктуры образцов большой толщины, где использование традиционных методов рентгеноструктурного анализа и фотонов с энергией 8-20 кэВ не в состоянии обеспечить контроль качества внутренней структуры. Использование более жёсткого излучения,



например, фотонов с энергией $\omega=412$ кэВ от распада ^{198}Au [3] может дать информацию о величине характерного угла мозаичности и распределении блоков мозаики по углу разориентации, но не в состоянии определить однородность их расположения по глубине образца.

Наиболее сложной задачей является определение характерных размеров блоков, от чего часто зависит возможность использования таких кристаллов в прикладных целях. Прямое измерение размеров микроблоков с помощью пучков рентгеновского излучения представляет собой сложную экспериментальную задачу и может быть использовано только для анализа поверхностных слоёв, см. например, [4]. Методы электронной микроскопии позволяют решать эту задачу применительно к тонким поликристаллическим и кристаллическим образцам, если углы разориентации соседних блоков и их размеры больше расходимости и линейных размеров электронного пучка [5]. Если получить тонкие кристаллические мишени без нарушения структуры невозможно, как, например, в случае пластичных металлических кристаллов, использование электронной микроскопии не может дать требуемой информации.

При использовании быстрых электронов варьируя механизм генерации излучения, изменением угла разориентации кристаллографических осей и плоскостей относительно направления электронного пучка, угол наблюдения и энергию регистрируемых фотонов можно получить более качественную информацию о микроструктуре кристаллов большой толщины, чем при применении рентгеновского излучения с фиксированной длиной волны или методами электронной микроскопии. Поэтому задача оценки качества внутренней структуры монокристаллов с помощью излучения, генерируемого при прохождении через них быстрых электронов, и достижимых в этом случае параметров в зависимости от энергии используемых частиц, является важной и актуальной.

2. Экспериментальная аппаратура и методика измерений

Большая часть анализируемых методик оценки внутренней микроструктуры кристаллов апробирована на томском синхротроне и микротроне НИИЯФ МГУ или основана на результатах проведенных там исследований [6-9], поэтому принципиальная схема расположения экспериментальной аппаратуры и используемые методики во многом близки к изложенным в цитируемых работах. В настоящий момент в России уже практически нет электронных ускорителей с энергией больше 100 МэВ, на которых проводятся исследования взаимодействия быстрых частиц с твердотельными мишенями, поэтому ограничимся энергиями ускоренных частиц 50-100 МэВ. Схема расположения экспериментальной аппаратуры для ориентации кристалла, измерения характеристик регистрируемого излучения с целью оценки качества микроструктуры кристаллов приведена на рисунке 1. Электронный пучок падает на исследуемый кристалл (Кр), установленный в гониометре с шагом вращения ~ 0.1 мрад, и отворачивается поворотным магнитом (М).

Для ориентации кристалла относительно направления электронного пучка и используется эффект излучения при осевом и плоскостном каналировании [10], приводящий к существенному увеличению интенсивности излучения в низкоэнергетичной части спектра при движении электронов под малыми углами относительно основных кристалло-

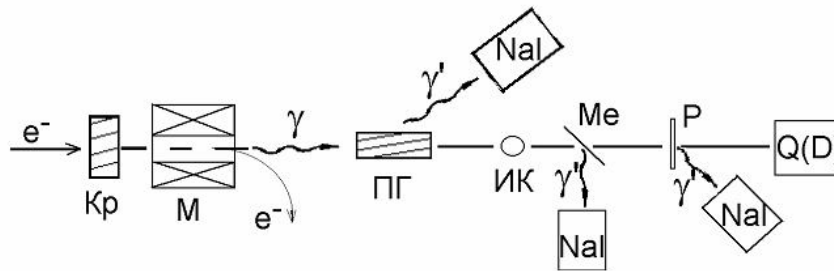


Рис. 1. Схема расположения экспериментальной аппаратуры.

Кр – исследуемый кристалл; М – поворотный магнит; ПГ – кристалл пиролитического графита; ИК – ионизационная камера; NaI – NaI(Tl) спектрометры; Ме – металлическая пластинка; Р – рассеиватель; Q – квантометр; D – дозиметр.

графических направлений. Регистрация совпадения направления движения электронов с осью или плоскостью кристалла (режим осевого или плоскостного каналирования) осуществляется по выходу характеристического рентгеновского излучения из тонкой металлической пластины (Ме) по методике работы [6] или комптоновских фотонов, рассеянных в конверторе (Р), по методике работы [11]. Обе мишени устанавливаются на пучке γ -излучения из кристалла и могут перемещаться поперек направления фотонного пучка для измерения углового распределения мягкой компоненты излучения. Регистрация рассеянного излучения осуществляется с помощью детекторов NaI(Tl), которые могут быть включены как в счётном [11], так и в токовом режиме [6]. Для этих же целей может использоваться тонкостенная ионизационная камера (ИК) [7].

Для выделения излучения в узком спектральном диапазоне и измерения низкоэнергетической части спектра в присутствии высокоэнергетических фотонов, распространяющихся в том же направлении, используется кристалл-дифракционный спектрометр на основе мозаичного кристалла пиролитического графита (ПГ), который так же может перемещаться в плоскости перпендикулярной направлению электронного пучка для измерения углового распределения излучения [8,9]. Регистрация дифрагированного излучения осуществляется детекторами NaI(Tl) различной толщины, включенными в счётном или токовом режиме в зависимости от решаемой задачи. Контроль режима ускорителя и нормировка получаемых экспериментальных данных осуществляется с помощью детектора интегральной интенсивности излучения в роли которого могут выступать квантометр (Q) или дозиметр (D). Для этой же цели используется датчик тока, имеющийся на каждом работающем ускорителе.

3. Экспериментальные методики оценок микроструктуры кристаллов

Как и в случае традиционного рентгеноструктурного анализа наиболее простой задачей является определение наличия мозаичности и оценка её характерного угла σ_m . Исследования ориентационных зависимостей (ОЗ) выхода фотонов когерентного тормозного излучения и излучения при каналировании электронов с энергией 890 МэВ



в мозаичном кристалле пиролитического графита ($\sigma_m \sim 3.3$ мрад) [12] показали, что наличие мозаичности приводит к уширению ОЗ выхода излучения при каналировании $\Delta\theta_{moz} \sim \sqrt{\Delta\theta_{per}^2 + 4\sigma_m^2}$, где $\Delta\theta_{per}$ и $\Delta\theta_{moz}$ ширины ОЗ для совершенного и мозаичного кристаллов.

Вместе с уширением ОЗ каналированного излучения в мозаичных кристаллах наблюдалось подавление выхода жестких фотонов и интегральной интенсивности коллимированного излучения из-за эффекта "квазипреломления" электронного пучка потенциалом плоскости кристалла [13] при совпадении направлений электронного пучка и усредненного направления плоскостей мозаичного кристалла. Для $\vartheta_c \approx \gamma^{-1}$, где γ^{-1} -характерный угол излучения, величина подавления была $\sim 30\%$. Для угла коллимации излучения $\vartheta_c \gg \gamma^{-1}$ подавление интегральной интенсивности отсутствовало. Подавление выхода фотонов с энергией 800 МэВ наблюдалось и при пересечении плоскости (110) мозаичного кристалла вольфрама в эксперименте [14]. Эффект становится заметным когда величина σ_m сопоставима с γ^{-1} , что для энергий электронов $E_e \sim 50-100$ МэВ ограничивает возможности этого способа оценки величины мозаичности кристалла значениями $\sigma_m \sim 2$ мрад и более.

Более информативные результаты и большую точность можно получить при наличии внутри кристалла моноблока, развернутого на некоторый угол относительно направления плоскостей основного объема кристалла. На рис. 2 приведена ориентационная зависимость выхода рассеянных фотонов из составной мишени, состоящей из двух кристаллов кремния толщиной 0.35 мм и ориентацией $\langle 110 \rangle$ [15]. Энергия электронов 900 МэВ, угол коллимации излучения $\vartheta_c=0.6$ мрад.

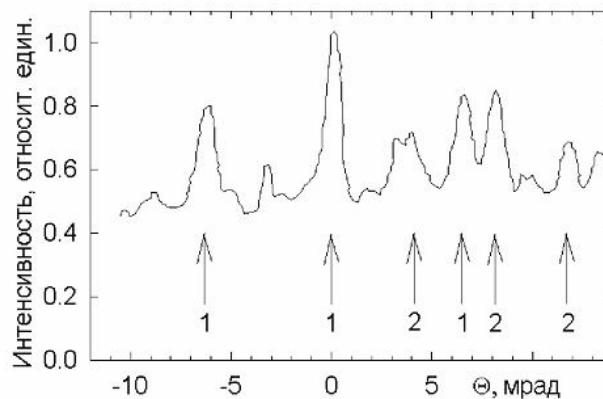


Рис. 2. Ориентационная зависимость выхода каналированного излучения из составной кремниевой мишени для $E_e=900$ МэВ и $\vartheta_c=0.6$ мрад [15]

Как видно из рисунка, плоскости, принадлежащие каждому из кристаллов, уверенно разделяются. При изменении угла разориентации расстояния между плоскостями разных кристаллов меняются неодинаково, что позволило в эксперименте [15] сориенти-



ровать вдоль направления электронного пучка ось каждого из кристаллов. С помощью таких же измерений можно оценить размеры и положение моноблока, расположенного внутри кристаллической мишени и развернутого относительно остальной части кристалла, если его размеры достаточно велики ($\sim 10-20\%$ от полной толщины мишени).

Известно, см., например, [1], что быстрая частица может быть захвачена в режим каналирования как при влёте в кристалл, так и внутри него вследствие многократного рассеяния в объёме мишени. В этом случае принято говорить о реканалировании или объёмном захвате в режим каналирования. В случае положительных заряженных частиц этот эффект уже давно используется для вывода части "гало" пучка из ускорителя для проведения тестовых измерений и очистки пучка. Этот же эффект наблюдается и для быстрых электронов. На рис. 3а приведены результаты исследования зависимости выхода излучения при плоскостном (110) каналировании электронов с энергией 900 МэВ в кристалле алмаза толщиной 10 мм от угла наблюдения [7] (•, плавные кривые проведены для удобства восприятия).

Измерения проведены с помощью тонкостенной прутковой ионизационной камеры. Угловой захват камеры $\Delta\theta_h=0.6$ мрад, $\Delta\theta_v=28$ мрад, в горизонтальной и вертикальной плоскости, соответственно. Ось камеры была параллельна плоскости (110) с точностью не хуже, чем 1-2 градуса. Угол разориентации оси $\langle 100 \rangle$ был ~ 40 мрад, то есть исследовалось только излучение при плоскостном каналировании. Из рисунков 3а и 3б видно, что при изменении угла наблюдения положение максимума ОЗ изменяется по линейному закону $\Theta = \theta_h$, то есть он наблюдается когда плоскость направлена на детектор. Здесь Θ – положение максимума в ОЗ, а θ_h – угол расположения камеры, отсчитываемый от направления электронного пучка, падающего на кристалл.

Амплитуда максимума в ОЗ пропорциональна числу электронов, рассеянных на угол $\theta_h \pm \Delta\theta_h/2$ и генерирующих фотоны посредством механизмов излучения при каналировании и так называемого надбарьерного излучения [16]. На рис. 3в (кривая) приведены результаты расчёта вероятности для электрона иметь заданный горизонтальный угол внутри кристалла вследствие многократного рассеяния. В расчёте предполагалась, что многократное рассеяние электронов в кристалле не отличается от рассеяния в аморфной (поликристаллической) мишени с такой же плотностью и толщиной и описывается теорией Мольера [17]. Точками показаны экспериментальные амплитуды максимумов в ОЗ на рис. 3а. Из-за относительного характера измерений экспериментальные данные и результаты расчёта совмещены с помощью масштабного множителя. Как показано в [7] такая же информация может быть получена и из угловых распределений, измеряемых путем перемещения камеры перпендикулярно направлению пучка электронов.

Как видно из рис. 3в, для всех углов наблюдения, кроме нулевого, экспериментальные данные и результаты расчёта практически совпадают. Отличие для нулевого угла наблюдения обусловлены тем, что в этом случае вклад в регистрируемый выход излучения дают не только электроны, рассеянные в заданный телесный угол внутри кристалла и генерирующие излучение при каналировании и надбарьерное излучение (о), но и частицы, захваченные в режим каналирования при влете в кристалл.

Хорошее согласие результатов измерений с расчётом, полученное в эксперименте [7], в совокупности с возможностью уверенного выделения блока достаточно больших раз-

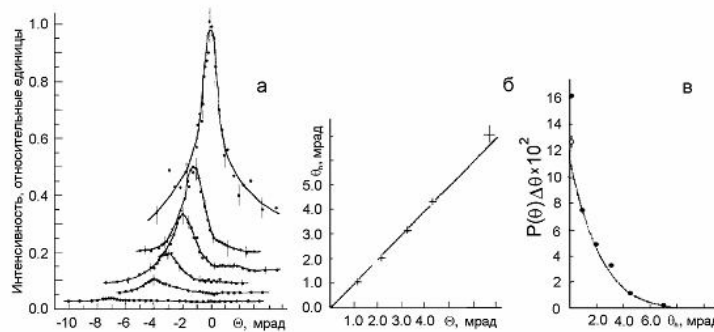


Рис. 3. Зависимость выхода излучения при плоскостном (110) каналировании электронов в кристалле алмаза от угла наблюдения [7]

меров по характеристикам детектируемого излучения, продемонстрированной в эксперименте [15], позволяют ставить вопрос о регистрации блоков, расположенных внутри кристалла. На рис. 4а приведена возможная схема реализации такого эксперимента. Мягкая компонента излучения регистрируется двумя детекторами. Один из них (D_1) регистрирует излучение, испущенное вдоль направления электронного пучка, и служит для отсчета углов разориентации плоскости относительно направления электронного пучка. Второй (D_2) используется для регистрации излучения, обусловленного объёмным захватом электронов в режим плоскостного каналирования в глубине кристалла, и может перемещаться в плоскости, перпендикулярной направлению пучка электронов.

На рис. 4б приведены результаты расчёта ориентационных зависимостей выхода излучения, регистрируемого детектором D_2 , для такой постановки эксперимента при наличии внутри кристалла вольфрама толщиной 1 мм блока толщиной 0.2 мм, развернутого относительно остальной части кристалла на угол 2 мрад. Глубина залегания блока 0.6 мм. Энергия электронов 900 МэВ. Угловой захват детектора D_2 в горизонтальной плоскости равен 0.6 мрад как и в эксперименте [7], а в вертикальном направлении не ничем ограничен. Методика расчёта совпадает с использованной в цитируемой работе. Зависимость 1 – ОЗ для нулевого угла расположения детектора D_2 и совершенного кристалла. Зависимости 2-7 соответствуют следующим углам расположения детектора D_2 для составного кристалла: 2 – 0 мрад; 3 – 4 мрад; 4 – 10 мрад; 5 – 20 мрад, 6 – 30 мрад и 7 – 40 мрад.

На рис. 4б приведены зависимости только когерентной компоненты излучения чувствительной к ориентации кристалла. Основным механизмом, создающим фоновую подложку, является тормозное излучение. В мишенях большой толщины угловое распределение результирующего излучения определяется многократным рассеянием электронов как и вероятность захвата в режим плоскостного каналирования, поэтому отношение пик/подложка слабо зависит от угла наблюдения (см. рис. 3а).

Из рисунка видно, что наличие моноблока такого размера приводит к появлению до-

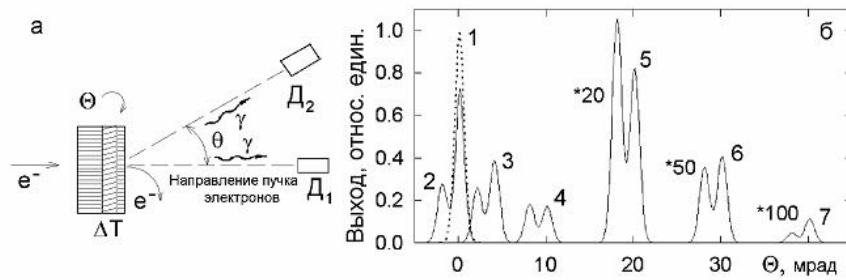


Рис. 4. Схема эксперимента и расчетные ориентационные зависимости выхода излучения при плоскостном (100) каналировании электронов в кристалле вольфрама, содержащем моноблок толщиной 0.2 мм, для нескольких углов наблюдения

полнительного пика, отстоящего от пика для основной части кристалла на угол разориентации этого моноблока. Для нулевого угла наблюдения амплитуда дополнительного пика существенно меньше, чем амплитуда основного пика. С увеличением угла наблюдения соотношение между амплитудами меняется. Для угла расположения детектора $D_2 \sim 20$ мрад пик, обусловленный наличием моноблока внутри кристалла, больше, чем пик, связанный с излучением электронов в остальной части кристалла. При дальнейшем увеличении угла наблюдения, что соответствует большим толщинам, амплитуда дополнительного пика опять становится меньше, чем основного пика.

Амплитуда дополнительного пика зависит от размеров блока, глубины его залегания и угла наблюдения, поэтому такие измерения позволяют определить наличие моноблока, оценить его положение в кристалле и размеры. Расчет выполнен для энергии электронов 900 МэВ. Уменьшение энергии электронов до 50-100 МэВ приведет к увеличению многократного рассеяния и более плавному уменьшению амплитуд основного и дополнительного пиков с ростом угла наблюдения. В связи с уменьшением энергии фотонов излучения при каналировании и интенсивности когерентного излучения с изменением энергии электронов потребуется детектор чувствительный к рентгеновской компоненте спектра $\sim 30-100$ кэВ. При выполнении этого условия описанная методика работоспособна и для этих энергий электронов.

В связи с уменьшением энергии электронов увеличатся характерный угол излучения и ширина ориентационных зависимостей, поэтому для сохранения чувствительности метода будет необходимо более широко использовать методы компьютерной обработки результатов измерений. Как известно, при наличии достаточной статистики положение максимума любого распределения можно определить с точностью существенно лучшей, чем ширина канала. Для увеличения относительного вклада дополнительного пика и улучшения чувствительности метода можно будет вводить ограничение по вертикальному углу захвата детектора. Методика позволяет определить и наличие посторонних включений, например, области аморфизации внутри кристалла. В этом случае зависимость амплитуды или площади пика в ОЗ от угла наблюдения уже не будет соответство-



вать расчётной. По области углов, где наблюдается отклонение результатов измерений от предсказаний расчёта можно сделать вывод о глубине и ширине этого включения.

Для проверки отсутствия взаимной разориентации блоков на противоположных поверхностях кристаллической мишени можно воспользоваться эффектом осевого каналирования и зависимостью сечения поглощения от энергии фотонов. В эксперименте [8] с помощью кристалл-дифракционного спектрометра на основе мозаичного кристалла пиролитического графита показано, что максимум в ОЗ выхода рентгеновских фотонов фиксированной энергии, генерируемых электронами с энергией 500 МэВ в кристалле кремния толщиной 0.35 мм наблюдается при направлении оси кристалла на детектор. Амплитуда максимума, как и в случае плоскостного каналирования, определяется процессом многократного рассеяния электронов в кристалле и зависит от угла наблюдения.

Схема эксперимента по контролю взаимной разориентации моноблоков на противоположных гранях кристалла практически совпадает с приведенной на рис. 4б. Детектор D_1 установлен на оси электронного пучка и регистрирует жесткое излучение, возникшее за счет эффекта осевого каналирования на входной грани мишени. По мере прохождения электронного пучка через кристалл, его угловое распределение расплывается, поэтому вклад излучения, обусловленного объёмным захватом электронов в режим осевого каналирования и зависящий от внутренней структуры кристалла, в показания этого детектора достаточно мал. В качестве такого детектора может быть использован любой детектор, показанный на рис. 1.

В качестве детектора D_2 используется кристалл-дифракционный спектрометр, настроенный на энергию фотонов 15-20 кэВ или ниже в зависимости от вещества и толщины исследуемого кристалла. В этом случае все регистрируемое излучение рождается около выходной грани и несёт информацию только структуре мишени в этой области. Если между противоположными гранями кристалла есть угол взаимной разориентации, то положение максимума в ОЗ выхода рентгеновского излучения, регистрируемого детектором D_2 , не будет совпадать с углом наблюдения. Для энергии электронов 50-100 МэВ характерная энергия фотонов излучения при осевом каналировании 100-300 кэВ, поэтому предлагаемый способ работоспособен и для этих энергий частиц. Ожидаемая точность способа порядка 1 мрад или несколько лучше, поскольку в эксперименте измеряются распределения по углам разориентации.

Наиболее привлекательной и интересной представляется возможность оценки средних размеров блоков в мозаичных кристаллах по характеристикам регистрируемого рентгеновского излучения. На рис. 5а приведены ориентационные зависимости выхода рентгеновского излучения с энергиями 67 кэВ и 96 кэВ, полученные в эксперименте [9] по поиску и исследованию параметрического рентгеновского излучения под малыми углами к скорости частицы в кристалле вольфрама, или, как его иногда называют, ПРИ вперед. Энергия электронов 500 МэВ. Измерения выполнены с помощью кристалл-дифракционных спектрометров на основе мозаичных кристаллов пиролитического графита и тонких NaI(Tl) детекторов. Разрешение спектрометров $\Delta\omega/\omega \sim 0.5-1\%$ определялось размерами кристаллов графита, энергией регистрируемых фотонов и углом коллимации дифрагированного излучения. Характеристики экспериментальной аппаратуры и методика измерений приведены в работах [8,9].



Положение минимумов в ОЗ соответствовало кинематическим условиям дифракции для фотонов, направленных вдоль оси экспериментальной установки, с погрешностью не хуже процента. Например, для $\omega=67$ кэВ расчётные положения минимумов для отражений $(10\bar{1})$, $(01\bar{1})$ и $(11\bar{2})$ – 46.6 мрад, 49.9 мрад и 72.2 мрад. Тогда как измеренные значения – 46.3 мрад, 49.5 мрад и 71.9 мрад. Другими словами, наличие провалов в ОЗ выхода жёстких фотонов обусловлено дифракцией тормозного излучения внутри кристалла. Глубина минимумов менялась от 15-18% для $\omega=67$ кэВ, до $\sim 10\%$ для $\omega=96$ кэВ. Типичное значение полной ширины минимума $\Delta\theta \sim 1.5 - 2.5$ мрад.

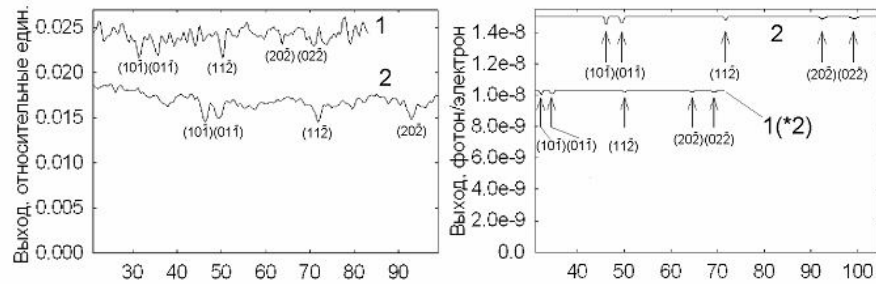


Рис. 5. Ориентационные зависимости выхода рентгеновского излучения из кристалла вольфрама толщиной 0.41 мм: 1 – $\omega=96$ кэВ; 2 – $\omega=67$ кэВ

На рис. 5б приведены расчётные ориентационные зависимости выхода рентгеновского излучения в направлении прямо-вперед для условий эксперимента [9] с учётом эффективности спектрометров и вклада переходного излучения с выходной грани кристалла для диапазона углов разориентации кристалла 30-100 мрад и энергий фотонов $\omega=96$ кэВ и $\omega=67$ кэВ, соответственно зависимости 1-2. Методика приближенного учета вклада дифракционного подавления выхода излучения в совершенных кристаллах приведена в [18].

Из рисунка видно, что глубина провалов в расчётных ориентационных зависимостях для плоскостей типа (110) и энергий фотонов 67 кэВ и 96 кэВ, соответственно $\sim 2.5\%$ и $\sim 1.5\%$ почти в пять раз меньше экспериментальных $\sim 15\%$ и $\sim 10\%$. Ширина расчётных зависимостей примерно в 1.5-2 раза меньше экспериментальных. Положение уверенно проявляющихся провалов хорошо согласуется с расчётом в том числе и для более слабых отражающих плоскостей (112) и (220) . Как и для более сильных плоскостей, глубина экспериментальных провалов для них в 5-7 раз больше, чем расчётных.

Известно, что мозаичные кристаллы лучше отражают рентгеновское излучение, чем совершенные [19], что может объяснить наличие относительно глубоких провалов в измеренных ориентационных зависимостях. С другой стороны, в анализируемом эксперименте впервые наблюдался динамический эффект в излучении быстрых электронов в кристаллах, что по умолчанию предполагает совершенство структуры кристалла. Выходом из сложившейся дилеммы является учёт того факта, что в мозаичных кристаллах так же могут проявляться динамические эффекты в отражении рентгеновского излу-



чения [19]. Для этого необходимо, что бы размер блоков с совершенной структурой был больше длины первичной экстинкции (для наших условий $\sim 2-3 \mu\text{м}$).

При выполнении условия и $l_{ex} < l < l_a$, где l - длина блока, а l_{ex} и l_a длины первичной экстинкции и поглощения фотонов, эффективность отражения рентгеновских лучей мозаичным кристаллом больше, чем у совершенного кристалла [19], что и наблюдалось в эксперименте [9]. В качестве подтверждения этого вывода следует отметить наличие поверхностной мозаичности $\sigma_m \approx 0.2$ мрад у этого кристалла. Стандартные методы рентгеноструктурного анализа не в состоянии определить качество внутренней структуры образцов такой толщины и состава. Поэтому можно только предполагать, что и внутренняя часть кристалла обладает примерно такой же мозаичностью.

Наличие отдельных микроблоков, развернутых на небольшой угол $\Theta > \Delta\theta$ относительно среднего направления, увеличивает вероятность отражения фотонов с энергией, на которую настроен спектрометр, что приводит к увеличению глубины провала и его ширины. В первом приближении можно считать, что наличие мозаичности приводит к эффективному увеличению ширины столика Дарвина [19] с $\Delta\theta \sim 0.03$ мрад до $\Delta\theta_{eff} \approx \Delta\theta + 2\sigma_m \sim 0.5$ мрад, что эквивалентно уширению спектра дифрагированного излучения $\Delta\omega$ с 40-70 эВ до $\sim 0.4 - 1.2$ кэВ в зависимости от энергии регистрируемого излучения. Эта величина сопоставима с энергетическим разрешением спектрометра, поэтому ширина провалов в экспериментальных ОЗ выхода излучения в 1.5-2 раза больше, чем в расчётных.

В качестве оценки величины вклада эффекта дифракционных потерь в выход регистрируемого излучения можно взять отношение длины поглощения к средней длине микроблока. Исходя из соотношения глубин экспериментальных и расчётных провалов для энергий фотонов $\omega=67$ кэВ (~ 5.4) и значения длины поглощения фотонов с этой энергией $l_a \approx 183 \mu\text{м}$ средний размер блоков в использованном в этом эксперименте кристалле вольфрама $\sim 30 \mu\text{м}$. Примерно такие же значения среднего размера блоков получаются и из сопоставления результатов измерений и расчётов и для энергии фотонов 96 кэВ.

Поскольку измеренное значение поверхностной мозаичности $\sigma_m \approx 0.2$ мрад сопоставимо с шириной столика Дарвина $\Delta\theta \sim 0.03$ мрад, должен наблюдаться эффект переотражения дифрагированного излучения, приводящий к уменьшению глубины провала. Поэтому реальное число блоков, обусловившее экспериментально зарегистрированное подавление выхода тормозного излучения, больше, а средняя длина блоков, соответственно, меньше. Об этом, в частности, свидетельствует тот факт, что для слабых плоскостей (112) и (220), для которых вероятность переотражения существенно меньше, отношение глубин провалов в экспериментальных и расчётных зависимостях увеличивается до $\sim 8-10$, что соответствует длине блока $\sim 20 \mu\text{м}$.

Такие исследования можно проводить и на ускорителях средних энергий ($E_0 \sim 30-50$ МэВ). Их преимуществом перед ускорителями на большие энергии является отсутствие других механизмов излучения. Это позволяет использовать и меньшие энергии фотонов, что позволит более точно определять размеры микроблоков. В эксперименте [9] в области энергий фотонов 40 кэВ вместо провала наблюдался пик, обусловленный механизмом ПРИ вперед. Не исключено, что и в измерениях для $\omega=67$ кэВ тоже на-



блюдался вклад этого механизма излучения, поэтому глубина провала, обусловленного эффектом дифракционных потерь излучения, на самом деле больше, а средний размер блоков, соответственно, меньше. Основные требования – наличие гониометра с шагом вращения не более 0.1 мрад и достаточно больших баз, что бы можно было реализовать методику выделения излучения с фиксированной энергией с разрешением $\Delta\omega/\omega \leq 0.5\%$ с помощью кристалл-дифракционного спектрометра на основе совершенного или мозаичного кристалла. Последнее, по-видимому, даже предпочтительнее, поскольку позволяет получить лучшее соотношение сигнал/фон при почти одинаковом энергетическом разрешении.

Одним из преимуществ предлагаемого подхода перед традиционными состоит в том, что этот метод работоспособен для толщин кристаллов, намного превышающих длину поглощения фотонов характеристического рентгеновского излучения материалов анода рентгеновских трубок, используемых в рентгеноструктурном анализе. С его помощью можно увидеть взаимную разориентацию блоков в объемном образце на угол $\sim 10^{-5}$ и меньше, что практически не возможно сделать с помощью традиционных методов [5].

Заключение

Результаты проведенного анализа способов оценки внутренней микроструктуры кристаллов большой толщины по характеристиками излучения электронов с энергией 50-100 МэВ в таких образцах кратко можно сформулировать следующим образом:

- 1) Использование излучения быстрых электронов в кристаллах позволяет определить наличие мозаичности исследуемого образца и сделать оценку её характерного угла σ_m .
- 2) Измерение угловых распределений или ориентационных зависимостей выхода мягкой компоненты когерентного излучения быстрых электронов в кристаллах позволяет определить наличие в них развернутых моноблоков, посторонних включений и взаимного разворота плоскостей на входной и выходной гранях.
- 3) Измерение дифракционного подавления выхода рентгеновского излучения с фиксированной энергией быстрых электронов в мозаичных кристаллах и его сопоставления с расчётным или измеренным для совершенного кристалла позволяет определить характерные размеры микроблоков в таких кристаллах.

Авторы выражают благодарность соавторам работ [6-9,12,14,15] за участие в разработке и реализации методик, использованных в процессе исследований, и помощь при проведении измерений. Работа выполнена при частичной поддержке ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России", ГК 16.740.11.0147 от 02.09.2010 и программы внутренних грантов БелГУ.

Литература

1. Рябов В.А. Эффект каналирования / В.А. Рябов. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 240 с.
2. Datz S., Berman B.L., Danling B.A., Hynes M.V., Park H., Kephart J.O., Klein R.K. and Pantell R.H. On the dependence of electron planar channeling radiation upon lattice vibration amplitude // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B. – 1986. – 13. – P.19-22.



3. Курбаков А.И., Трушов В.А., Дмитриев Р.П. и др. Гамма-дифракционные исследования структурного совершенства монокристаллов. Метод и аппаратура // Препринт ЛИЯФ. – N 1307, июль 1987 г., 59 с.
4. Ohler M., Baruchel J., Moore A.W., Galez Ph., Freund A. Direct observation of mosaic blocks in highly oriented pyrolytic graphite // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B. – 1997. – 129. – P.257-260.
5. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ / С.С. Горелик. – М.: МИСИС, 2002. – 360 с.
6. Баклапов Д.А., Внуков И.Е., Гришин В.К., Жандармов Ю.В., Ермаков А.Н., Шатохин Р.А. Предложение эксперимента по поиску и исследованию дифрагированного излучения каналированных электронов // Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2010. – 3. – С.26-36.
7. Амосов К.Ю., Андряшкин М.Ю., Внуков И.Е., Калинин Б.Н., Науменко Г.А., Потылицын А.П., Сарычев В.П. Исследование угловых распределений мягкой компоненты релятивистских электронов вблизи плоскостной ориентации монокристаллов большой толщины // Известия ВУЗов, "Физика". – 1991. – 6. – С.70-80.
8. Внуков И.Е., Калинин Б.Н., Кирьяков А.А., Науменко Г.А., Падалко Д.В., Потылицын А.П. Мягкая компонента излучения каналированных электронов в кристалле кремния // Известия ВУЗов "Физика". – 2001. – 44; 3. – С.71-80.
9. Алейник А.Н., Балдин А.Н., Богомазова Е.А., Внуков И.Е., Калинин Б.Н., Кубанкин А.С., Насонов П.И., 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. – 80;6. – С.446-451.
10. Кумахов М.А. Излучение каналированных частиц в кристаллах / М.А. Кумахов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 160 с.
11. Калинин Б.Н., Копвалова Е.И., Плешков Г.А., Потылицын А.П., Тарасов В.М., Томчаков В.К., Хакбердыев И. Автоматизированная система ориентирования монокристаллических мишеней в электронном ускорителе // ПТЭ. – 1985. – 3. – С.31-35.
12. Amosov S.Yu., Kalinin B.N., Naumenko G.A., Potylitsin A.P., Verzilov V.A. and Vnukov I.E. Experimental Investigation of Coherent Bremsstrahlung in a Mosaic Pyrolytic Graphite Crystal // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 1996. – 119. – P.103-107.
13. Ермак В.П., Касьян С.В., Кошпик К.С., Нога В.И., Санин В.М. Квазипреломление электронного пучка монокристаллом кремния // ВАПиТ, сер. ЯФИ. – 1990. – 3(11). – С.18-21.
14. Внуков И.Е., Воробьев С.А., Забаев В.Н., Калинин Б.Н., Курков А.А., Потылицын А.П. Подавление выхода жесткого гамма-излучения в конус $1/\gamma$ при прохождении электронов вблизи кристаллографической оси или плоскости // ЖТФ. – 1984. – 54;7. – С.1399-1402.



15. Amosov K.Yu., Vnukov I.E., Kalinin B.N. et al. Investigation of thick crystal mosaic structure // The Fourth All-Union Conference on Interaction of Radiation with solids, Moscow, 1990. – P.123.
16. Ахиезер А.И., Шульга Н.Ф. Электродинамика высоких энергий в веществе / А.И. Ахиезер. – М.: Наука, 1993. – 344 с.
17. Bethe H.A. Moliere's theory of multiple scattering // Phys. Rev. – 1953. – 89;6. – P.1256-1266.
18. Бакланов Д.А., Балдин А.И., Внукон И.Е., Печаенко Д.А., Шатохин Р.А. Соотношение вкладов дифрагированного тормозного излучения и параметрического рентгеновского излучения в совершенных кристаллах // Вестник Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина. – 2007. – 763, сер.физ. "Ядра, частицы, поля". – 1;33. – С.41-56.
19. Джеймс Р. Оптические принципы дифракции рентгеновских лучей / Р. Джеймс М.: Изд.Иностран.Лит.,1950. – 464 с.

CHARACTERISTICS ESTIMATE OF THE LARGE THICKNESS CRYSTALS BY MEANS OF FAST ELECTRONS IRRADIATION

D.A. Baklanov, I.E. Vnukov, Yu.V. Zhandarmov,
S.A. Laktionova, R.A. Shatokhin

Belgorod State University,

Studencheskaya St., 14, Belgorod, 308007, Russia, e-mail: vnukov@bsu.edu.ru

Abstract. Characteristics of the irradiation emitted by the transmission of fast electrons through the crystal is analyzed. They depend on the internal structure quality. Measuring methods of the crystal mosaicity, microblock sizes and external inclusions by means of characteristics of detected radiation are discussed.

Key words: fast electron, crystal, mosaicity, radiation yield, channeling, microstructure, bulk, experiment.