

УДК 53.084.2

**Решение проблемы возникновения высших порядков в нейтронном потоке
после монохроматора PG (002)**

А.А. Павельева, К.И. Бусуек

Научный руководитель: доцент, к.т.н., В.Н. Кудияров

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова НИЦ «Курчатовский институт»,

Россия, г. Гатчина, Орлова роща, 1, 188300

E-mail: paveleva_aa@pnpi.nrcki.ru

**The solution to the problem of occurrence of higher orders in the neutron flux
after the PG monochromator (002)**

A.A. Pavleva, K.I. Busuek, V.N. Kudiyarov

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

NRC «Kurchatov Institute» - PNPI, Russia, Gatchina, Orlova roshcha, 1, 188300

E-mail: paveleva_aa@pnpi.nrcki.ru

Abstract. *In this paper, we will describe the modeling of a graphite filter for reducing the intensity of higher orders in a neutron beam.*

Key words: *neutrons, monochromators, modelling, McStas.*

Введение

Поликристаллические материалы описываются не только своей микроструктурой, но и текстурой, которая представляет собой функцию распределения кристаллографических ориентаций зерен относительно внешней системы координат. Высокий вклад текстуры материала в его механические свойства и прочностные характеристики очевиден в достаточной степени. Что указывает на важность в исследовании текстуры новых материалов.

Метод нейтронной дифракции для анализа текстуры аналогичен хорошо известным рентгеновским методам дифракции. Однако основное преимущество нейтронной дифракции заключается в том, что взаимодействие нейтронов с материалом гораздо слабее и не зависит от количества электронов. Поэтому глубина проникновения нейтронов в исследуемый объем, примерно, на 3 порядка выше, чем рентгеновского излучения.

Одними из ярких примеров установок по нейтронной текстурной дифракции являются D20 (ILL High-Flux Reactor, Франция), STRESS-SPEC (FRM II, Германия), Kowari (OPAL, Австралия), NTD (CARR, Китай), FCD (HANARO, Южная Корея) и VULCAN (HFIR, США), установки размещены как на стационарных, так и на импульсных исследовательских реакторах. На территории России на данный момент эксплуатируется установка СКАТ на базе импульсного реактора ИБР-2, однако установки для текстурной нейтронной дифракции на базе реактора с постоянным потоком нейтронов в настоящее время нет.

Экспериментальная часть

Установка текстурной нейтронной дифракции TEX-2 (FRG-1, Германия), в рамках договора по научному сотрудничеству России и Германии, была передана в Петербургский институт ядерной физики имени П.Б. Константинова на реакторный комплекс ПИК (РК ПИК).

Существенное различие в мощностных характеристиках реактора FRG-1 и РК ПИК привело к необходимости модернизации установки TEX-2 (рис. 1) до установки под названием TEX-3, которая бы соответствовала характеристикам РК ПИК и позволяла проводить исследования соответствующие развитию науки в настоящее время.

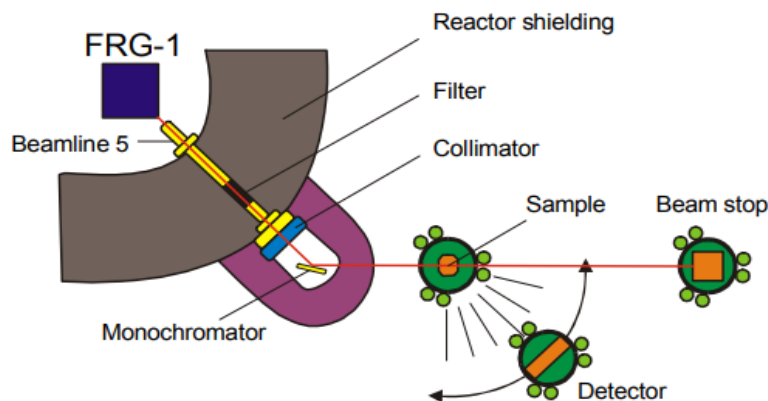


Рис. 1. Схема установки TEX-2

Одним из основных элементов станции TEX-3 является монокроматор, применение которого позволяет из общего потока нейтронов выделять часть с требуемой длины волны, что напрямую влияет на качество получаемых результатов. Принцип действия данного элемента основан на законе Вульфа-Брэгга, следствием которого является возможность выделения необходимой длины волны за счет оптимальной комбинации кристалла отражателя со свойственным ему межплоскостным расстоянием и углом поворота данного кристалла по отношению к направлению приходящего потока нейтронов.

В качестве кристалла отражателя для монокроматора установки TEX-3 предлагается использовать Cu (111), Cu (200) и PG (002). Применение данных кристаллов позволит реализовать требуемый диапазон длин волн нейтронов, необходимый для проведения широкого спектра экспериментов.

Пиролитический графит PG является эффективным благодаря высокой отражательной способности, достигающей 90 %. Его применение особенно актуально для образцов с межплоскостным расстоянием более 1,5 Å. Однако, в кристаллах PG отражение нейтронного потока происходит не только от плоскостей (002), но и от их высших порядков. Таким образом, наблюдается вклад высших гармоник в суммарную интенсивность потока нейтронов, приходящих на образец, что приводит к подавлению вклада нейтронов с полезной длины волны в полученные результаты, существенно снижая разрешение полученных данных. Таким образом, для решения данной проблемы, возникает необходимость в применении следующего элемента - нейтронного фильтра. Одним из таких элементов является фильтр на основе графита, эффективно исключая второй или третий порядки отражения.

Основной характеристикой графитового фильтра является его толщина. Подбор данного значения для обеспечения выполнения требуемых параметров нейтронного потока возможен за счет проведения моделирования всей установки и данного элемента в среде McStas.

Результаты

Для понижения интенсивности высших порядков отражения и повышения разрешающей способности установки при использовании монокроматора PG (002) была разработана и реализована математическая модель установки с фильтром перед монокроматором. В математической модели были использованы параметры установки, полученные с помощью аналитического расчета, которые считались близкими к предполагаемым оптимальным параметрам установки и были уточнены также в ходе математического моделирования.

Для определения оптимальных параметров фильтра проведено параметрическое исследование, в котором варьировалась толщина графитовой пластины в диапазоне от 0,00 до 0,15 м с шагом 0,01 м для режима моделирования: угол поворота монокроматора PG (002) с постоянной решетки 3,35 Å $2\theta = 37,2^\circ$, $\lambda_{\min} = 0,8$ Å, $\lambda_{\max} = 3$ Å. Результаты моделирования представлены на рис. 2. Исходный поток нейтронов имел интенсивность

$4,7 \cdot 10^{13}$ усл. ед. (соответствующую реакторному комплексу ПИК для нейтронновода, выделенного под установку ТЕХ-3). Для достижения максимальной эффективности установки необходимо минимизировать потерю интенсивности, на каждом из элементов установки, особенно на монохроматоре. Оптимальной толщиной графитового фильтра является та, при которой будет выполнено предположение, что влияние нейтронов второго и третьего порядка на спектр рассеянных образцом нейтронов будет незначительным и может быть учтено как шум в процессе обработки экспериментальных данных.

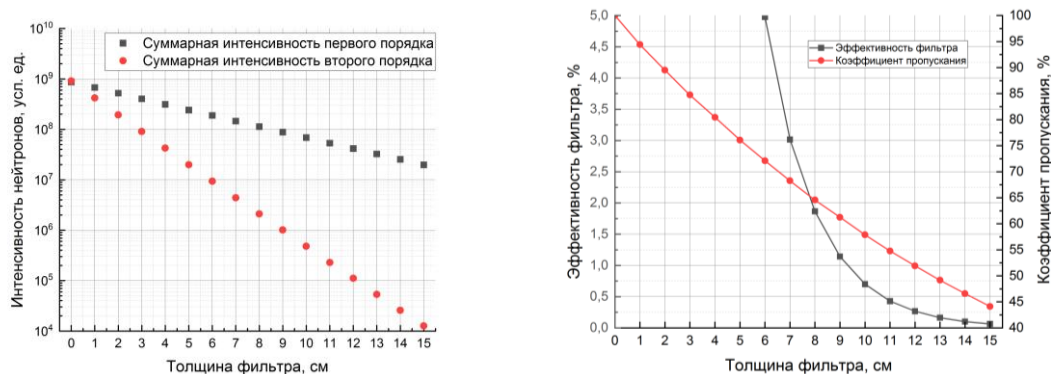


Рис. 2. Зависимость интенсивности потока нейтронов от толщины фильтра для первого и второго порядка отражения и зависимость эффективности и коэффициента пропускания от толщины фильтра

Оптимальная интенсивность нейтронов на образце должна быть не ниже 10^7 усл. ед. Толщина фильтра до 10 см является недостаточной, так как суммарная интенсивность нейтронов $\lambda/2$ при 9 см все еще остается высокой и составляет примерно 10^6 усл. ед., поэтому выбор оптимальной толщины фильтра сужается до диапазона от 10 до 15 см.

При толщине 15 см коэффициент пропускания фильтра оказывается ниже 45 %, в то время как, наиболее эффективным является коэффициент пропускания равный 55 %, обеспечивающий достижение компромисса между разрешающей способностью и светосилой установки при использовании кристалла PG в качестве монохроматора, а также интенсивность нейтронов основной длины волны $2,14 \text{ \AA}$ оказывается недостаточной и составляет $3,4 \cdot 10^6$ усл. ед. Таким образом, оптимальная толщина фильтра по результатам моделирования составляет 12 см, при данной толщине фильтра интенсивность нейтронов с длиной волны $2,14 \text{ \AA}$ и суммарная интенсивность первого порядка отражения составляют $7,4 \cdot 10^6$ и $4,2 \cdot 10^7$ усл. ед., соответственно. Первый порядок отражения при выбранной мозаичности монохроматора 40° составляет интервал длин волн от $1,93$ до $2,33 \text{ \AA}$. Интенсивность высшей гармоники с длиной волны $1,07 \text{ \AA}$ составляет $4,7 \cdot 10^4$ усл. ед., эффективность и коэффициент пропускания фильтра составляют 0,28 % и 52 %, соответственно.

Заключение

При значении толщины фильтра 12 см наблюдается достижение оптимальной эффективности фильтра и при последующем увеличении толщины наблюдается только уменьшение интенсивности «полезных» нейтронов в общем потоке.

Список литературы

1. Pranzas P.K. GeNF experts neutron report // Neutron science. – 2008. – P.207–211.
2. Adib M. Characteristics of pyrolytic graphite as a neutron monochromator // Material science. – 2011. – P. 18–23.
3. Em V.T. A double-crystal monochromator for neutron stress diffractometry // Instruments and Experimental Techniques. – 2017. – Vol. 60. – P. 526–532.
4. Anderson I.S. Neutron techniques // International Tables for Crystallography. – 2006. – P. 430–487.