

РАЗРАБОТКА БРЭГГОВСКОГО МОНОХРОМАТОРА ДЛЯ ИСТОЧНИКА ОЧЕНЬ ХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ

В. С. Шпилевская^{1,2}, Г. В. Кулин¹, А. И. Франк¹*

¹Объединённый институт ядерных исследований, Дубна, Россия

²Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

*E-mail: shpilevskaya@jinr.ru

В Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка Объединённого института ядерных исследований ведется работа над концептуальным проектом источника ультрахолодных нейтронов (УХН), создание которого планируется на реакторе ИБР-2М. В основу концепции источника положена идея замедления импульсного потока очень холодных нейтронов (ОХН) магниторезонансным методом непосредственно перед ловушкой до энергии УХН с последующим их импульсным накоплением в этой ловушке [1].

Работа над проектом источника УХН требует проведения ряда методических экспериментов с ОХН, которые в настоящее время неосуществимы ОИЯИ. Поэтому на первом этапе работ по проекту планируется создать тестовый канал, обеспечивающий широкий спектр ОХН. В планируемом источнике ОХН, которые после замедления конвертируются в УХН, соответствует узкий диапазон продольных компонент скоростей [1]. Все методические эксперименты желательно проводить с близким к необходимому диапазоном скоростей ОХН, поэтому планируемый тестовый канал будет оснащён монохроматором, позволяющим сформировать пучок нейтронов с продольными компонентами скоростей 20 ± 1 м/с.

Для монохроматизации пучка тепловых или холодных нейтронов обычно используются кристаллические монохроматоры. Известно, что направление дифракционных максимумов при заданной длине волны λ падающих нейтронов и конкретном межплоскостном расстоянии d в кристалле определяется условием Вульфа-Брэгга:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (1)$$

где θ – угол скольжения, n – порядок дифракционного максимума. Для медленных нейтронов, таких как ОХН, длина волны составляет десятки и сотни ангстрем, что значительно превышает межплоскостные расстояния в кристаллах. В данной работе для монохроматизации пучка ОХН предлагается использовать брэгговское зеркало, представляющее собой периодическую структуру чередующихся слоёв никеля и титана, которые характеризуются высоким и низким эффективными потенциалами [3] соответственно. Расчёт оптимальных толщин слоёв проводился так, чтобы для каждого из слоёв этой пары для нормальной компоненты $v_{\perp}$ происходила конструктивная интерференция.

При проектировании монохроматора одним из требований было сохранить после монохроматизации исходное направление пучка, а потому была выбрана геометрия из двух брэгговских зеркал, расположенных под углом $\theta=45^\circ$ к оси пучка. При таком угле падения нейтронов со скоростью 20 м/с их нормальная компонента $v_{\perp}$ будет равна $14 \div 15$ м/с, а соответствующие толщины слоёв составят $d_{Ti} = 102.4$ Å и $d_{Ni} = 39.95$ Å.

Из-за наличия углового расхождения исходного пучка условию Вульфа-Брэгга могут удовлетворить нейтроны вне желаемого диапазона скоростей, из-за чего возникает необходимость его коллимации. Необходимая степень коллимации определяется условием:

$$\Delta\theta = \frac{\pi \hbar \Delta u}{u^2 m_n a \cos \theta'} \quad (2)$$

где Δu – разброс скоростей после монохроматизации, d – толщина бислойа, $\hbar$ – постоянная Планка, m_n – масса нейтрона. Полагая $\Delta u = 2$ м/с, получаем $\Delta\theta = 5.4^\circ$. Поскольку

коллимация требуется лишь по одному направлению, возможно применение обычного многощелевого коллиматора.

Численное моделирование брэгговского монохроматора показало, что после монохроматизации доля нейтронов с продольными компонентами скоростей 20 ± 1 м/с по отношению к доле таких же нейтронов в исходном спектре уменьшается на порядок.

Было проведено сравнение предлагаемого подхода с подходом на основе механической селекции скоростей [4]. Было показано, что при той же степени коллимации степень монохроматизации в случае использования селектора скоростей оказывается в два раза хуже.

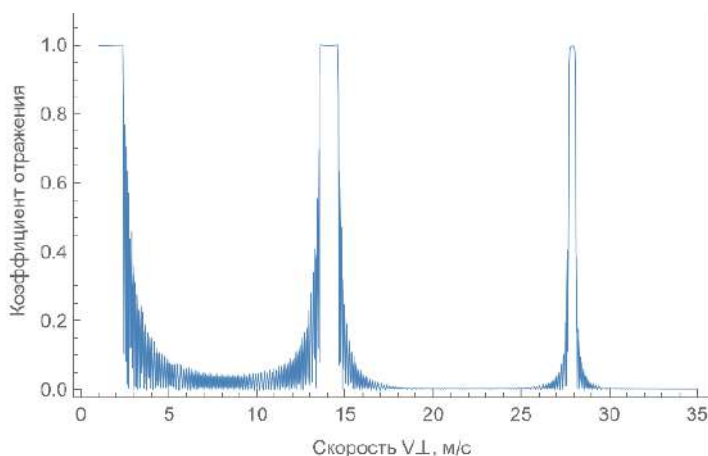


Рис. 1. Коэффициент отражения брэгговского зеркала в зависимости от компоненты скорости, нормальной к его поверхности.

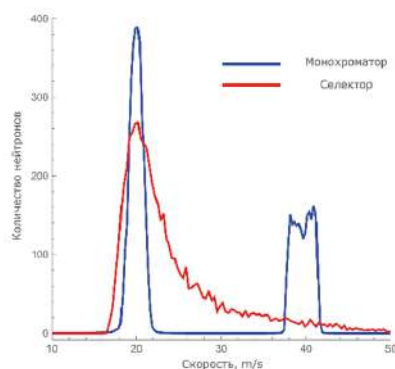
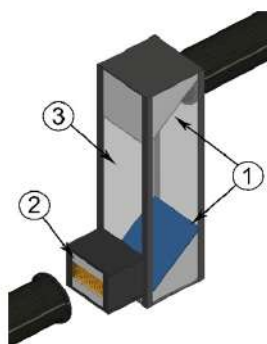


Рис. 2. 3D дизайн брэгговского монохроматора: 1 - брэгговские зеркала, 2 - многощелевой коллиматор, 3 - вертикальный нейтронотвод из плоских никелевых зеркал (слева); распределение нейтронов после прохождения монохроматора или селектора (справа).

1. А. И. Франк, Г. В. Кулин, М. А. Захаров, Письма в ЭЧАЯ **20** (4), 664 – 667 (2023).
2. R. Golub, D. Richardson, S. K. Lamoreaux, Ultra-cold neutrons, Adam Hilger, New York, (1991).
3. Т. Кылышбек, Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD), (2022).