

15

Применение поликристаллического висмутового фильтра для источника ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия

© А.П. Серебров, В.А. Лямкин, В.В. Рунов, С.А. Иванов,
М.С. Онегин, А.К. Фомин

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
(ПИЯФ) НИЦ „Курчатовский институт“, Гатчина
E-mail: serebrov@pnpi.spb.ru

Поступило в Редакцию 2 июня 2015 г.

Рассмотрен вопрос о целесообразности применения поликристаллического висмутового фильтра перед источником ультрахолодных нейтронов (УХН) на основе сверхтекучего гелия при температуре 1 К. Применение такого фильтра позволяет снизить тепловыделение в источнике в 30 раз до уровня 0.5 W. При этом фильтр снижает поток нейтронов с длиной волны 9 Å (которые конвертируются в УХН) приблизительно на 30%. Изучен эффект малоуглового рассеяния на поликристаллическом висмуте и продемонстрировано его практическое отсутствие. Охлаждение фильтра до температуры жидкого азота увеличивает пропускание нейтронов с длиной волны 9 Å всего на 8%, поэтому создание системы охлаждения фильтра является нецелесообразным. Для источника УХН на реакторе ПИК представлен проект технологического комплекса, способного отводить 1 W тепловой мощности при температурном уровне 1 К.

В настоящее время в ПИЯФ завершается создание научно-исследовательского реакторного комплекса ПИК — одного из шести на территории России проектов, включенных Правительством РФ в программу создания собственных мегаустановок мирового класса. Горизонтальные каналы реактора ПИК ГЭК-3 и ГЭК-4 будут оснащены жидкодейтериевыми источниками холодных нейтронов для проведения фундаментальных исследований и изучения наноструктур. На этих пучках планируется установить источники для производства ультрахолодных нейтронов (УХН) [1].

Источники ультрахолодных нейтронов представляют собой камеры со сверхтекучим гелием, расположенные на выведенных пучках каналов ГЭК-3 и ГЭК-4. Сверхтекучий гелий будет играть роль конвертера холодных нейтронов в ультрахолодные [2]. Для увеличения производительности источника камеры должны иметь вытянутую форму вдоль пучка. Гелий конвертирует нейтроны с длиной волны 9 \AA в ультрахолодные нейтроны на пути пучка, мало ослабляя его. Допустима длина камеры 2–3 м.

Пучок нейтронов от источника холодных нейтронов сопровождается γ -квантами и быстрыми нейтронами. Тепловая мощность, выделяемая при поглощении такого пучка, составляет приблизительно 100 W. В камере источника и в сверхтекучем гелии выделяется 15–20% мощности, и создание источника на основе сверхтекучего гелия при температуре 1 K представляет достаточно сложную технологическую задачу.

Были рассчитаны параметры источника объемом 1521. Длина цилиндрической части камеры составляла 2 м, диаметр 300 мм, толщина стенки камеры полагалась равной 1.5 мм. Цилиндрическая часть камеры с обеих сторон заканчивалась полусферами. Средняя плотность потока нейтронов с длиной волны 9 \AA для камеры объемом 1521 оказалась равной $1.1 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{\AA}^{-1}$. Суммарная производительность источника при этом составит $1.3 \cdot 10^7 \text{ UCN/s}$ для спектра УХН от нуля до 8 м/с. Граничная скорость стенок источника составляет 8 м/с, так как используется покрытие из ^{58}Ni на стенках камеры и стенках нейтронотводов.

Расчет энерговыделения в гелиевой камере проводился с учетом вклада от нейтронов и γ -квантов. Кроме мгновенных γ -квантов учитывались запаздывающие γ -кванты от активной зоны реактора, а также от распада ядер ^{28}Al , накапливающихся при радиационном захвате нейтронов алюминием. Теплоприток от γ -квантов в стационарном режиме от различных элементов конструкции источника составил 3.6 W в оболочке и 11.3 W в гелии. Такой теплоприток является слишком большим для температурного уровня 1 K.

Значительно уменьшить тепловыделение в источнике можно постановкой перед ним поликристаллического висмутового фильтра. Висмут является хорошей защитой от γ -излучения [3]. Был проведен расчет энерговыделения в камере источника УХН с фильтром толщиной 100 мм. Энерговыделение уменьшилось в 30 раз по сравнению с

Мощность энерговыделения в элементах конструкции гелиевой камеры при использовании висмутового фильтра и без использования висмутового фильтра (последнее указано в скобках)

Параметры		Оболочка камеры	Гелий
m, g		8730	22040
$\Delta E, W$	$n + \gamma$	0.14 (3.6)	0.26 (11.3)
	β	0.12 (0.95)	—
Суммарное, W		0.26 (4.55)	0.26 (11.3)
Общее, W		0.52 (15.85)	

камерой без фильтра (таблица). Это позволит существенно упростить технологический процесс поддержания температурного уровня 1 К, а также очень сильно уменьшить стоимость необходимого оборудования.

Возникает вопрос, как будет ослаблен нейтронный пучок при постановке висмутового фильтра. Исследования с висмутовыми кристаллическими фильтрами проводились и ранее. На рис. 1, а представлены результаты исследований, которые были выполнены в 2003 г. в работах [4,5]. Исследования показывают, что коэффициент пропускания холодных нейтронов через охлажденный до 77 К фильтр на 12% больше, чем при использовании этого же фильтра при комнатной температуре. Поликристаллический висмут толщиной 20 см пропускает ~ 80% нейтронного спектра с $\lambda > 0.65$ nm, причем коэффициент пропускания нейтронов вблизи с $\lambda = 0.47$ nm менее 6%. Таким образом можно отделить нейтронный поток не только от γ -квантов, но и от высокоэнергетических нейтронов, практически не участвующих в производстве УХН.

Был поставлен вопрос о возможном малоугловом рассеянии холодных нейтронов на поликристаллическом фильтре, из-за которого расходимость пучка будет увеличена и пучок не впишется в пределы камеры источника УХН. В связи с этим были проведены исследования на малоугловом дифрактометре „Вектор“ реактора ВВР-М. „Вектор“ — мультidetекторная установка малоуглового рассеяния поляризованных нейтронов с анализом поляризации рассеянных нейтронов. Энергети-

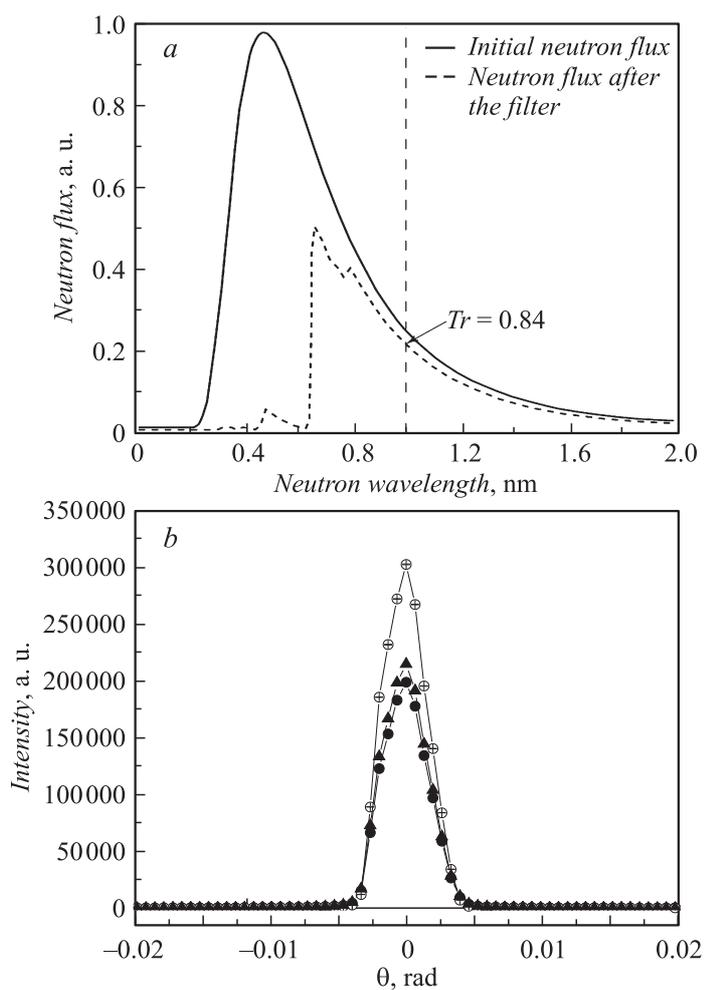


Рис. 1. Исследования с поликристаллическим висмутовым фильтром холодных нейтронов. *a* — нейтронные спектры до и после фильтра. *b* — расходимость нейтронного пучка: открытые кружки — без Вi-фильтра, сплошные кружки — с Вi-фильтром, $T = 300$ К, треугольники — с Вi-фильтром, охлажденным до температуры 80 К.

ческий спектр установки „Вектор“ очень удачно подходит для проведения этих исследований, так как перекрывает нужный диапазон длин волн 8–10 Å [6–7].

Для эксперимента с охлаждением висмутового фильтра до азотных температур был собран опытный криостат. Фильтр охлаждался от емкости с жидким азотом через медную пластину. Пространство между емкостью с азотом и корпусом откачивалось до 10^{-5} mm Hg во избежание конденсации влаги на висмуте. В месте прохождения нейтронного пучка стенка алюминиевого корпуса была сточена до 1 mm, чтобы уменьшить число поглощенных корпусом нейтронов. Предварительные измерения трансмиссии на криостате без висмута дали коэффициент пропускания 96.88% для нейтронного спектра с $\lambda = 8-12$ Å. Такая трансмиссия на корпусе криостата, при толщине стенки в 1 mm, является приемлемой.

Перед проведением основной части эксперимента по определению увеличения расходимости нейтронного пучка после фильтра необходимо было измерить начальную расходимость нейтронного пучка. Для этого была измерена исходная интенсивность нейтронов с $\lambda > 7$ Å в пределах $(-0.02-0.02)$ rad, а затем после постановки висмутового фильтра. При пропускании нейтронного пучка с $\lambda = 8-12$ Å через висмут малоуглового рассеяния не наблюдается.

Перед охлаждением висмута был поставлен эксперимент по определению трансмиссии на „теплом“ висмуте при комнатной температуре. Для этого была измерена интенсивность нейтронов с висмутом (9 cm) и без него. Рассчитанная таким образом трансмиссия оказалась равной 66%.

Охлаждение висмута осуществлялось теплообменом висмута с жидким азотом через медную раму. Таким образом, имело место постепенное снижение температуры. В течение всего этапа охлаждения проводились измерения интенсивности нейтронов, прошедших через висмут. Измерения проводились с периодичностью в 10 min. Увеличение трансмиссии за счет охлаждения составило 8%. При отогреве висмута до комнатной температуры трансмиссия вернулась к первоначальному значению.

На рис. 1, b представлен общий результат проведенных исследований. Численное значение трансмиссии через „теплый“ висмут составило 66%. Численное значение трансмиссии через охлажденный до $T \approx 80$ K висмут составило 73%. Учитывая то, что криостат ослабля-

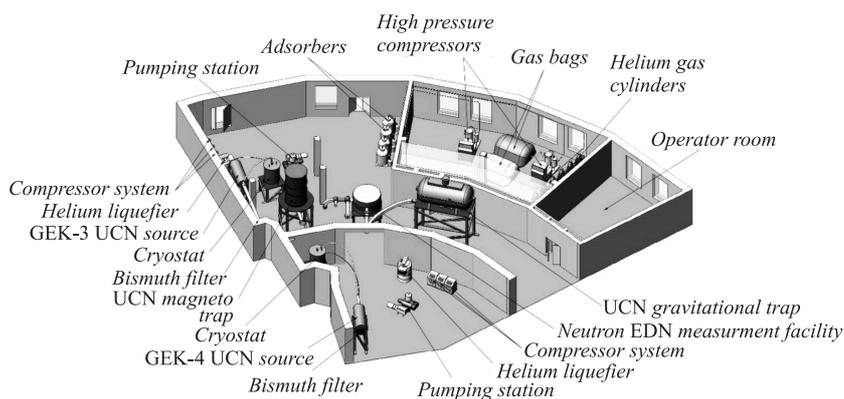


Рис. 2. Общий вид научной станции источника УХН на реакторе ПИК.

ет интенсивность пучка приблизительно на 3%, особого смысла делать охлаждаемый фильтр нет.

Благодаря применению поликристаллического висмутового фильтра решена проблема снижения теплопритока к сверхтекучему гелию до уровня 0.5 W. В связи с этим разработан проект технологического комплекса, способного отводить 1 W тепловой мощности при температурном уровне 1 K со сверхтекучего гелия для источника УХН на реакторе ПИК. В состав комплекса входят источник УХН, криогенный блок, система откачки паров гелия, компрессорная система, система хранения и газораспределения гелия. Параметры и режимы оборудования согласованы между собой. Проект такого комплекса представлен на рис. 2.

Исследование выполнено в ПИЯФ НИЦ „Курчатовский институт“ за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00105).

Список литературы

- [1] Серебров А.П., Фомин А.К., Онегин М.С. и др. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 1. С. 24.
- [2] Golub R., Pendlebury J.M. // Phys. Lett. 1977. V. 62A. N 5. P. 337.

- [3] *Машикович В.П., Кудрявцева А.В.* // Защита от ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1995. С. 495.
- [4] *Adib M., Kilany M.* // Radiat. Phys. Chem. 2003. V. 66. P. 81.
- [5] *Adib M., Naguib K., Ashry A.* et al. // Ann. Nucl. Energy. 2002. V. 29. P. 1119.
- [6] *Рунов В.В., Ильин Д.С., Рунова М.К.* и др. // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 95. В. 9. С. 530.
- [7] *Рунов В.В., Скоробогатых В.Н., Рунова М.К.* и др. // ФГТ. 2014. Т. 56. В. 1. С. 68.