



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2002–41
ОЭФ

А. Горин¹, Б. Герар², Й. Киянаги³, К.-И. Курода⁴, И. Мануйлов¹,
Б.К. Моримото⁵, Т. Оку⁵, А. Рязанцев¹, П. Сержу², А. Сидоров¹,
Г.М. Шимизу⁵, Дж. Сузуки⁶, Ф. Такеучи⁷, Ф. Токанаи⁸

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПОТОКОВ НЕЙТРОНОВ
С ПОМОЩЬЮ
ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДЕТЕКТОРА
НА СПЕКТРОСМЕЩАЮЩИХ ВОЛОКНАХ**

Направлено в NIM.

-
- ¹ ИФВЭ, Протвино, Россия.
² Институт Лауэ-Ланжевена, Гренобль, Франция.
³ Университет Хоккайдо, Япония.
⁴ ОИЯИ, Дубна, Россия.
⁵ РИКЕН, Вако-Саитама, Токио, Япония.
⁶ SPring-8, JASRI, Япония.
⁷ Университет Киото-Саньё, Киото, Япония.
⁸ Университет Ямагата, Япония.

Протвино 2002

Аннотация. Горин А., Герар Б., Киянаги Й. и др. Визуализация потоков нейтронов с помощью позиционно-чувствительного детектора на спектросмещающих волокнах. Препринт ИФВЭ 2002-41. – Протвино, 2002. – 7 стр., 7 рис., библиогр. 4.

Детектор высокого разрешения, предназначенный для визуализации потока холодных нейтронов (визуализатор), был изготовлен для группы нейтронной оптики (NOP) в РИКЕНе. Он проверялся на пучке тепловых нейтронов в институте Лауэ-Ланжевена (ILL) в Гренобле. Детектор состоит из тонкой пластины $\text{ZnS(Ag)+}^6\text{Li}$ сцинтиллятора, оптически контактирующего со спектросмещающими волокнами типа Y11(400). Измеренное пространственное разрешение визуализатора оказалось около 0,45 мм, что соответствует шагу укладки квадратных спектросмещающих волокон ($0.4 \times 0.4 \text{ мм}^2$). С помощью ^3He монитора оценена эффективность регистрации тепловых нейтронов ($\lambda = 2.5 \text{ \AA}$), которая составила около 10%, что должно обеспечивать достаточную эффективность при регистрации холодных нейтронов ($\lambda = 10 \text{ \AA}$).

Ответственный автор: А.Горин, e-mail: gorin@mx.ihep.su

Abstract. Gorin A., Guerard B., Kiyonagi Y. et al. Neutron Imaging Device Using Wave Length Shifting Fibre Technique. IHEP Preprint 2002-41. – Protvino, 2002. – p.: 7, figs.: 6, refs.: 4.

A high resolution imaging device for cold neutrons detection has been constructed for the neutron optics (*nop*) Group in RIKEN, and tested with thermal neutrons at the Laue-Langevin Institute in Grenoble. It consists of a thin plate of $\text{ZnS(Ag)+}^6\text{LiF}$ scintillator optically coupled with Y11(400) wave-length shifting (WLS) fibres. The space resolution was found to be $\sim 0.45 \text{ mm}$ in FWHM as expected from the pitch of WLS fibres with a crossection of $0.4 \times 0.4 \text{ mm}^2$. The detection efficiency for thermal neutrons ($\lambda = 2.5 \text{ \AA}$) was estimated with respect to ^3He monitor, and found to be $\sim 10 \%$, which ensured a reasonable efficiency for cold neutrons ($\lambda = 10 \text{ \AA}$).

PACS: 29.40.Gx

Keywords: Neutron imaging device, Scintillator, WLS fibre, PSPM.

Corresponding author: A.Gorin, e-mail: gorin@mx.ihep.su

Введение

Используемые в различных детекторах физики высоких энергий многоанодный (позиционно-чувствительный) фотоумножитель (PSPM) и спектросмещающие (WLS) волокна, объединенные в одном детекторе, позволили нам разработать новый тип прибора для визуализации изображений, основанный на регистрации оптического излучения на уровне отдельных фотоэлектронов и даже фотонов [1]. После успешного применения этой технологии для создания быстрого визуализатора гамма-излучений для SPring-8 [2] мы разработали визуализатор холодных нейтронов, использующий $\text{ZnS(Ag)} + {}^6\text{LiF}$ сцинтиллятор.

1. Экспериментальная установка

Структура чувствительной области визуализатора схематически показана на **рис. 1**. Плоскость детектора перпендикулярна к направлению регистрируемых частиц. Собственно детектором нейтронов является тонкая (0.4 мм) пластина $\text{ZnS(Ag)} + {}^6\text{LiF}$ сцинтиллятора размером $58 \times 58 \text{ мм}^2$. Этот полупрозрачный сцинтиллятор излучает свет в области длин волн около $\lambda \sim 430 \text{ нм}$ с быстрой постоянной высвечивания около 100 нс, а общее время высвечивания составляет порядка десятка микросекунд.

Для съема световых импульсов со сцинтиллятора используются две сборки квадратных в сечении WLS-волокон типа Y11(400) (производства фирмы KURARAY, Япония) по 128 волокон в каждой. Длина волокон составляет около 150 мм, а поперечное сечение – $0,4 \times 0,4 \text{ мм}^2$. На дальние торцы волокон нанесено алюминиевое зеркало. Для уменьшения оптических перекрестных наводок между волокнами установлены отражатели-сепараторы из алюминизированного майлара толщиной 50 микрон и результирующий шаг волокон – 0.45 мм. Сборки волокон приклеены с помощью оптической эпоксидной смолы сверху (X-слой) и снизу (Y-слой) сцинтиллятора во взаимно-перпендикулярных направлениях, что и обеспечивает двумерное считывание координат.

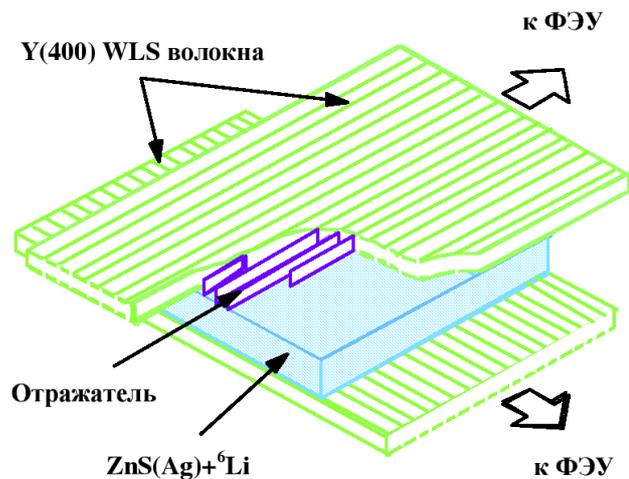


Рис. 1. Устройство нейтронного визуализатора.



Рис. 2. Внешний вид детектора со снятыми крышками.

WLS-волокна присоединяются к 64-канальным PSPM типа H7546 (изготовлены фирмой HAMAMATSU Photonics, Япония) с помощью кондукторов с 64 отверстиями в каждом, предварительно откалиброванных так, чтобы центры отверстий с волокнами совпадали с центрами секций ($2 \times 2 \text{ мм}^2$) фотокатода PSPM. Этот фотоумножитель имеет одноэлектронный спектр, хорошо отделяющийся от пьедестала и низкий шум, что позволяет регистрировать однофотонные сигналы. Фотография детектора со снятой крышкой показана на **рис. 2**. Визуализатор имеет тонкое входное окно, выполненное из алюминиевой фольги толщиной 0.03 мм, для уменьшения рассеяния нейтронов, ухудшающего пространственное разрешение. Пассивное поглощение нейтронов слоем WLS-волокон толщиной 0,4 мм не превышает 5%.

В детекторе используются 4 фотоумножителя: два в X- и два в Y- проекции. Последний динод PSPM дает положительный сигнал, являющийся суммой сигналов всех каналов ФЭУ и этот сигнал используется для выработки триггера системы считывания. Из-за относительно низкого коэффициента усиления фотоумножителя ($\leq 10^5$) и для улучшения эффективности регистрации одноэлектронных сигналов рабочее напряжение фотоумножителей типа H7546 устанавливалось довольно высоким (950 и 850 В для PSPM X-проекции и 890 и 925 В для Y) по отношению к максимальному напряжению (900 В), установленному изготовителем.

Надетекторная электроника состоит из 16 дискриминаторов с 16 каналами каждый. Дискриминаторы выдают импульсы фиксированной длительности (20 нс) на скрученную пару и имеют дистанционное управление для настройки порогов в каждом канале. Входные усилители дискриминаторов были специально доработаны для считывания сигналов медленного сцинтиллятора: дополнительный инвертирующий усилитель последнего динода имеет постоянную интегрирования 50 нс и усиление около 40; анодный усилитель имеет время интегрирования 20 нс и усиление около 30. Дискриминаторы имеют встроенную функцию *Пикочувствительного Алгоритма* [3] для динамического подавления перекрестных наводок в соседних каналах. Выходные сигналы дискриминатора – биполярный ЭСЛ (для 16 анодных каналов) и отрицательный аналоговый (последнего динода).

Для считывания сформированных сигналов использовались специализированные модули стандарта КАМАК: 32-канальные многочастичные ВЦП типа LeCroy 3377 (всего 8 модулей) и LeCroy 2249А АЦП – для записи аналоговых сигналов последних динодов.

Система сбора данных основывалась на IBM ПК, соединенном с крейтом КАМАК, и обеспечивала считывание 260 каналов (128 + 128 координатных и 4 канала последних динодов). Максимальный счет системы сбора данных, обусловленный, в основном, временем оцифровки АЦП – около 2000 событий в секунду. Триггерный сигнал вырабатывался при совпадении сигналов последних динодов X- и Y-плоскостей: $(X1+X2)*(Y1+Y2)$ во временном окне около 200 нс.

2. Экспериментальные результаты

Для тестирования визуализатора использовался поток тепловых ($\lambda = 2.5 \text{ \AA}$) нейтронов, выведенных из ядерного реактора ILL. Интенсивность пучка была на уровне $\sim 10^5$ нейтронов в секунду. При этом средняя множественность событий при регистрации одиночных нейтронов была на уровне $\sim 1,2$ в каждой плоскости, и потери при декодировке событий не превышали 5%. Профиль пучка нейтронов показан на **рис. 3**.

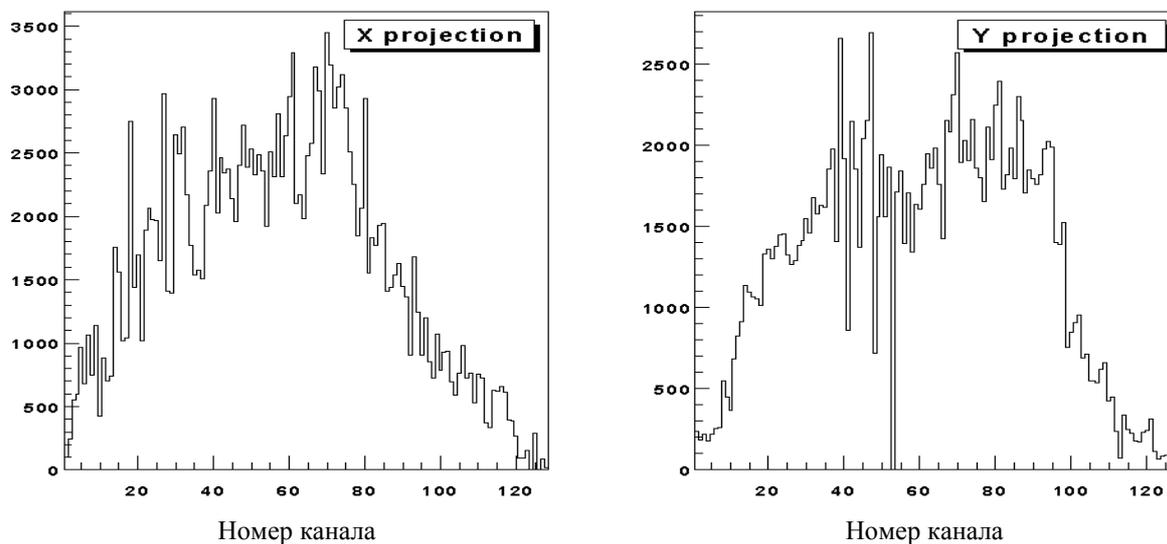


Рис. 3. Профили потока нейтронов: X- и Y-проекции.

Пороги дискриминаторов подстраивались таким образом, чтобы профиль пучка был возможно более гладким. Но для некоторых каналов это было довольно трудной задачей из-за большой разницы в счете числа событий (пропорционального квантовой эффективности фотокатода) по площади фотокатода. Эта разница особенно существенна при регистрации малых световых потоков. Типично один край фотокатода имеет меньшую чувствительность и можно наблюдать систематические флуктуации счета с периодом 8 каналов.

Пространственное разрешение детектора проверялось со щелевым (0,2 мм) коллиматором, изготовленным из кадмиевой пластины толщиной 1 мм. Полученный результат показан на **рис. 4**. Пространственное разрешение, одинаковое для обеих координат, составило 0,45 мм (полная ширина на полувысоте), что соответствует шагу укладки WLS-волокон.

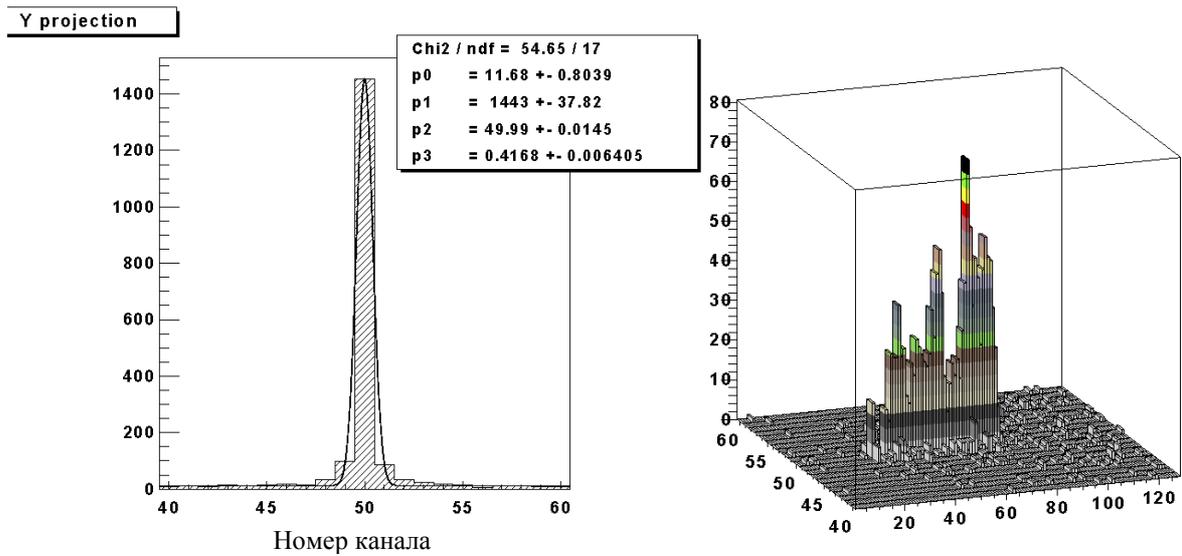


Рис. 4. Пространственное разрешение нейтронного визуализатора: проекция и 3-D плот.

Амплитудное распределение последнего динода приведено на рис. 5. Левый узкий пик – это пьедестал, а сигнальное распределение достаточно широкое и имеет длинный хвост с большими амплитудами из-за плохой прозрачности $ZnS(Ag) + {}^6LiF$ и малой длительности времени интегрирования (0,5 мкс). Точную величину световыхода для наших условий найти затруднительно. Для оценки было определено среднее значение переизлученного выхода света, которое оказалось на уровне 3–5 фотоэлектронов.

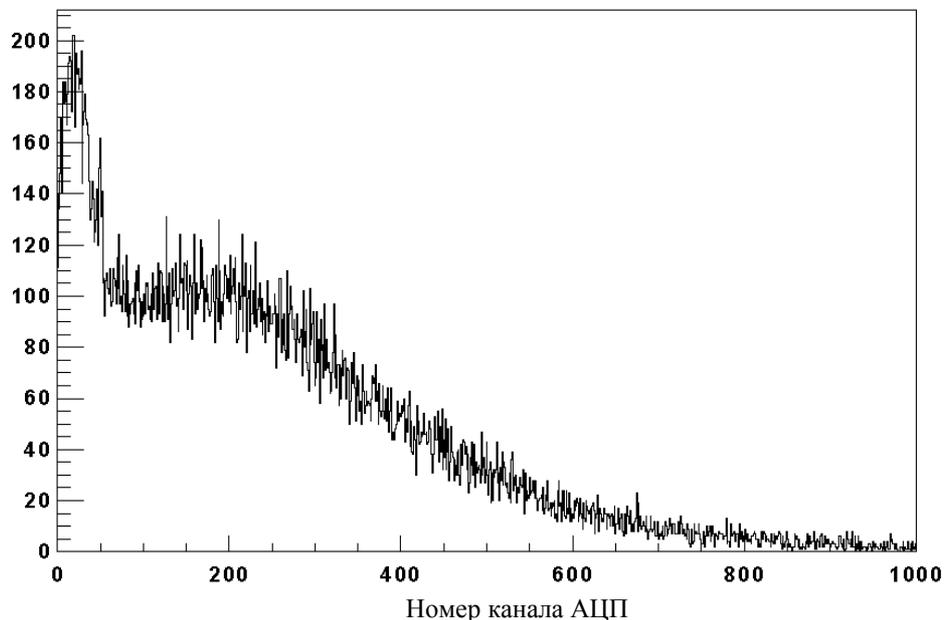


Рис. 5. Амплитудный спектр последнего динода.

Последующие тесты были сделаны для того, чтобы продемонстрировать возможности визуализатора при регистрации двумерных распределений нейтронов.

На **рис. 6** представлен результат двух последовательных экспозиций с различной ориентацией кадмиевого коллиматора с наклонной щелью шириной 0.5 мм. Несмотря на наложение двух экспозиций (происходит суммирование фоновых событий), общий уровень фона достаточно низок и щели отчетливо видны. Кроме того, видно, что геометрические искажения изображения отсутствуют, что является характерной чертой визуализатора с волоконным считыванием, когда погрешность восстановления координаты события определяется точностью укладки WLS-волокон и расходимостью пучка.

Другой пример двумерного изображения показан на **рис. 7**. Кадмиевая пластина толщиной 1 мм использовалась для поглощения потока нейтронов, и в ней были просверлены отверстия диаметром 0,5 мм в виде букв. Непосредственно наблюдаемое изображение приведено на **рис. 7 слева**. Более чистое изображение, показанное на **рис. 7 справа**, получено при обработке картинки при наложении порога: показаны только ячейки, в которых имеется больше 10 событий.

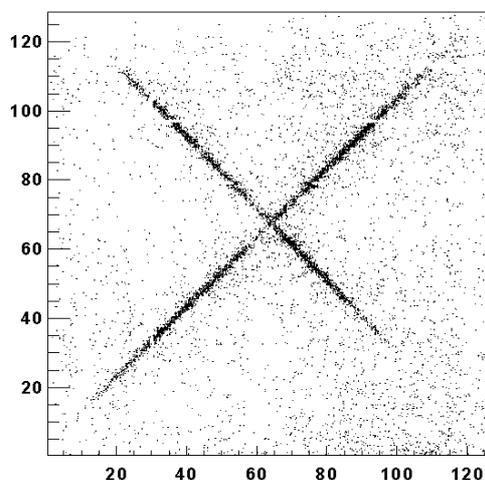


Рис. 6. Изображение наклонных щелей в кадмиевом коллиматоре.

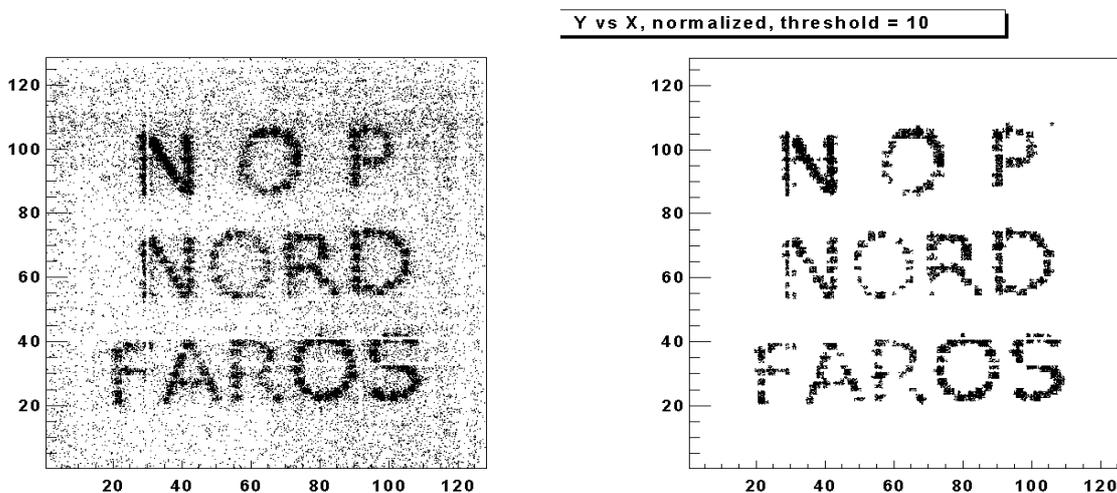


Рис. 7. Нейтронное изображение мелких отверстий, выполненных в виде букв.

3. Обсуждение

При проведении этих исследований для создания двумерного нейтронного визуализатора 64-канальный фотоумножитель типа Н7546 использовался впервые. Это очень хороший, компактный и экономичный фотоумножитель, однако мы испытали заметные трудности при получении однородной эффективности регистрации для всех каналов, как было показано

на рис. 2. По сравнению с 16-канальными фотоумножителями типа H6568, использованными в прототипе нейтронного детектора [4], 64-канальные имеют меньшее усиление, большую флуктуацию усиления и квантовой эффективности по каналам, так что настройка порогов дискриминаторов становится довольно деликатной. На практике, мы можем только уменьшить чувствительность лучших каналов, доведя ее до уровня средних и, таким образом, эффективность регистрации нейтронов становится заметно меньшей. Так, эффективность регистрации тепловых нейтронов ($\lambda = 2.5 \text{ \AA}$), измеренная с помощью ^3He монитора, составила около 10% в обсуждаемом детекторе, а в прототипе [4] заметно лучше – 18%.

Кроме того, позиционирование концов волокон на фотокатоде H7546 не является простым из-за малого размера ($2 \times 2 \text{ мм}^2$) пикселей (каналов ФЭУ) и не очень точного положения диодной системы в корпусе PSPM. При создании описываемого детектора эту проблему удалось решить с помощью трудоемкой предварительной калибровки – процедуры нахождения оптимального положения кондуктора с волокнами по отношению к фотокатоду – на специально созданном стенде.

Следует отметить, что визуализатор обеспечивает возможность получения временной привязки (с точностью порядка 100 нс с нашим кристаллом $\text{ZnS(Ag)} + ^6\text{LiF}$), которая не использовалась при постоянном потоке нейтронов. Однако эта привязка может быть чрезвычайно полезна в экспериментах с импульсными источниками нейтронов при использовании время-пролетных методик. Оценка максимальной загрузки визуализатора (при равномерном облучении всей поверхности детектора) дает величину $\sim 10^6$ нейтронов в секунду.

Описываемый детектор представляет собой достаточно гибкую и универсальную структуру, параметры которой (координатное разрешение, размеры, эффективность регистрации, число каналов) могут быть выбраны исходя из требований конкретного эксперимента. Вполне возможно, например, создание детектора площадью $0,5 \times 0,5 \text{ м}^2$, с пространственным разрешением $\sim 1 \text{ мм}$ при увеличении общего числа каналов считывания до ~ 1000 .

Заключение

На пучке тепловых нейтронов в ILL был проведен успешный тест нейтронного детектора (визуализатора), основанного на сцинтилляторе с волоконным съемом и PSPM. Полученное пространственное разрешение ($\sim 0.45 \text{ мм FWHM}$) и $\sim 10\%$ -ная эффективность регистрации обеспечивают мощный инструмент для дифракционных экспериментов на холодных нейтронах, предусмотренных в планах японской лаборатории атомной энергии (JAERI).

Существенное улучшение характеристик визуализатора может быть достигнуто при использовании более прозрачных нейтронных сцинтилляторов с хорошим световыходом и соответствующим спектром излучения. Быстродействие прибора и предельные загрузки также полностью определяются временем высвечивания сцинтиллятора. Разработка и применение борили литий-содержащих сцинтилляторов с высокими световыходами и короткими временами высвечивания является весьма актуальной задачей.

Благодарности

Мы очень признательны техническому персоналу ILL за безупречную организацию проведения измерений на пучке тепловых нейтронов. Мы благодарны коллаборации ДИРАК в ЦЕРНе за любезную возможность использования электронных модулей. Мы горячо приветствуем эффективную техническую помощь компании OYO-KOKEN Co. Ltd. (Япония) при завершении монтажа детектора.

Авторы признательны также В. Васильченко и С. Садовскому (ИФВЭ) за плодотворные комментарии при подготовке этой статьи.

Список литературы

- [1] K. Kuroda and I. Manuilov. Nucl. Instr. and Method. A430 (1999), 311.
- [2] M. Suzuki, H. Toyokawa, M. Mizumaki et al. Nucl. Instr. and Method. A467-468 (2001), 1121.
- [3] A. Gorin, M. Kobayashi, K. Kuroda et al. Nucl. Instr. and Method. A452 (2000), 280-288.
- [4] A. Gorin, K. Kuroda, I. Manuilov et al. "A Novel Type of Position-Sensitive Detector for Slow Neutrons", International Workshop on Position-Sensitive Neutron Detectors, Jagdschloss Glienicke June 28 –30, 2001, PSND2001 / eds.: Th. Wilpert and B. Gebauer, published by Hahn-Meitner-Institut Berlin GmbH, Germany, vol. 1, pp. 173-180.

Рукопись поступила 21 ноября 2002 г.

А. Горин, Б. Герар, Й. Киянаги и др.
Визуализация потоков нейтронов с помощью позиционно-чувствительного детектора на
спектрсмещающих волокнах.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы WORD.

Редактор Н.В. Ежела. Технический редактор Н.В. Орлова.

Подписано к печати 25.11.2002. Формат 60 x 84/8. Офсетная печать.
Печ.л. 0.87 . Уч.-изд.л. 0.7. Тираж 130. Заказ 178. Индекс 3649.
ЛР №020498 17.04.1997.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

