

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОЙ СЕПАРАЦИИ НЕЙТРОНОВ

Ю.В. Дробышевский*, **И.М. Анфимов****, **В.А. Варлачев*****,
С.П. Кобелева**, **С.А. Некрасов******, **С.Н. Столбов***

* 000 Протиус

124498, Москва, Зеленоград, 4922-й проезд, 2

** Национальный исследовательский технологический университет МИСиС
119049, Москва, Ленинский просп., 4

*** Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634034, Томск, просп. Ленина, 30

**** Центральный экономико-математический институт РАН
117418, Москва, Нахимовский просп., 47



Получено экспериментальное подтверждение работоспособности конструкции концентратора нейтронов устройств, формирующих и использующих направленные высокоинтенсивные пучки тепловых нейтронов с каналами эллиптического профиля, выполненного в виде блоков пластин из профилированного графита и алюминия. Эффект отражения нейтронов от поверхности материалов положен в основу устройства, обладающего способностью проводить селекцию нейтронов по направлению в пространстве. Экспериментально проверена работоспособность конструкции замедляюще-фокусирующей структуры (ЗФС) на базе пакета нейтронных зеркал эллиптической формы, которая позволяет формировать ориентированные пучки тепловых нейтронов из выходящего потока нейтронов реактора. Используются кремниевые монокристаллические пластины, применение которых позволяет получать портреты интегральных потоков нейтронов в реакторе с целью регистрации эффекта селективной сепарации тепловых нейтронов. Эксперименты проводили в канале ГЭК-4 на реакторе ИРТ-Т НИТПУ. Интегральный поток нейтронов составил $(2,3 - 3,02) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Нейтронный поток детектировали по изменению удельного электросопротивления пластин монокристаллического кремния. Эффект концентрирования тепловых нейтронов зарегистрирован на блоках как графитовых нейтронных зеркал, так и алюминиевых тонкостенных эллиптических зеркал. В ближайшей перспективе на его основе можно решить задачу продления ресурса реактора в результате снижения наводороживания внутренних стенок. Экспериментально доказана возможность создания анизотропных структур, лежащих вне формализма теоремы Лиувилля, в которых сформированы поверхности стоков тепловых нейтронов с последующей концентрацией в выделенных алюминиевыми или графитовыми пластинами областях.

Ключевые слова: тепловые нейтроны, плотность потока нейтронов, пучки тепловых нейтронов, эллиптические зеркала, способ и устройство для исследования потока тепловых нейтронов, нейтронное легирование, кремний.

© Ю.В. Дробышевский, И.М. Анфимов, В.А. Варлачев, С.П. Кобелева,
С.А. Некрасов, С.Н. Столбов, 2020

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач современной науки и техники является создание устройств, формирующих и использующих направленные высокоинтенсивные пучки тепловых нейтронов [1 – 3]. Такие устройства имеют широкий спектр применения, например, создают путь к разработке высокоэффективных детекторов нейтронов, новой технологии нейтронного легирования полупроводников [4, 5].

Возможность реализации таких устройств обусловлена тем, что поведение нейтронов в замедлителе, вне замедлителя и на границе раздела сред существенно различается. Создание устройства, обладающего способностью проводить селекцию нейтронов по направлению в пространстве, базируется на применении эффекта отражения нейтронов от поверхности материалов [6].

Угол полного внешнего отражения нейтронов $\varphi_s \approx \arcsin(v_{гр}/v_0)$ определяется отношением граничной скорости нейтрона $v_{гр}$ на поверхности вещества к скорости $v_0 = 2200$ м/с тепловых нейтронов реактора.

Значение φ_s равно 10° для поверхности графита, 12° для бериллия, 10.7° для железа, 11.5° для никеля, 9.5° для меди, 5.0° для алюминия [6].

Можно представить условия отражения нейтронов через показатель преломления нейтронов на поверхности вещества

$$n^2 = 1 - \frac{\lambda^2}{\pi} Nb \pm \frac{\mu_n B}{E_n}, \quad (1)$$

где $\lambda = h/\mu_n v_n$ – дебройлевская длина волны нейтрона со скоростью v_n ; N – концентрация ядер; b – длина когерентного рассеяния ядер вещества; μ_n – магнитный момент нейтрона; B – магнитная индукция поля, действующего на нейтрон внутри ферромагнетика; E_n – энергия нейтрона.

В патенте РФ предложена конструкция замедляюще-фокусирующей структуры (ЗФС) на базе пакета нейтронных зеркал эллиптической формы, которая позволяет формировать ориентированные пучки тепловых нейтронов из выходящего потока нейтронов реактора [6].

Целью работы является экспериментальная проверка эффекта селективной сепарации нейтронов на отдельных пластинах на блоке селективирующих элементов.

Для регистрации эффекта селективной сепарации тепловых нейтронов были использованы кремниевые монокристаллические пластины, применение которых позволяет получать портреты интегральных потоков нейтронов в реакторе.

Кремниевые монокристаллические пластины были расположены вблизи пакета пластин селективирующих элементов, облучаемых полем тепловых нейтронов реактора.

В процессе облучения изотопа кремния ^{30}Si нейтронами образуется стабильный изотоп ^{31}P , происходит нейтронное легирование кремния [4] и изменение его проводимости. Контроль идет путем измерения удельного электросопротивления (УЭС) на поверхности кремниевых пластин. Кремниевые монокристаллические пластины представляют собой удобный датчик нейтронного потока реактора из-за малого сечения взаимодействия кремния с нейтронами, что позволяет измерять стандартные потоки тепловых нейтронов с приемлемой точностью.

КОНСТРУКЦИЯ И РАБОТА ЗАМЕДЛЯЮЩЕ-ФОКУСИРУЮЩЕЙ СТРУКТУРЫ

Рассмотрим многократные отражения пристеночного потока тепловых нейтронов на профилированном зеркале с переменной уменьшающейся кривизной вдоль его движения. Сепарация нейтронов в криволинейных каналах селекции показана на рис. 1.

Результатом многократного отражения пристеночных нейтронов на поверхности

пластин, радиус кривизны R которых гладко растет до каждого последующего отражения луча, является то, что при этом идет пристеночная концентрация (сжатие) пучка.

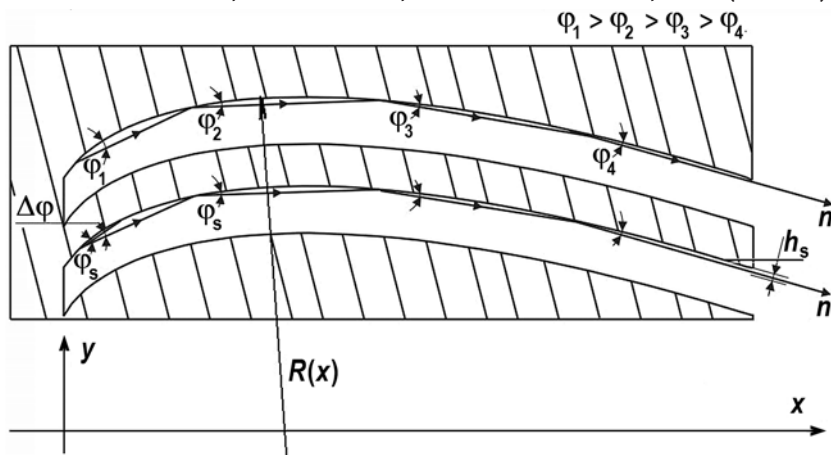


Рис. 1. Селектирование нейтронов в криволинейных каналах селекции: φ_i – угол падения-отражения нейтрона к поверхности при i -1-отражении; $\varphi_2 \leq \varphi_s$; φ_1 – угол к поверхности селектирующего элемента для первичного входа нейтрона n ; $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_s$; h_s – толщина пристеночного слоя селектированного потока; $R(x)$ – радиус кривизны поверхности селектирующего элемента

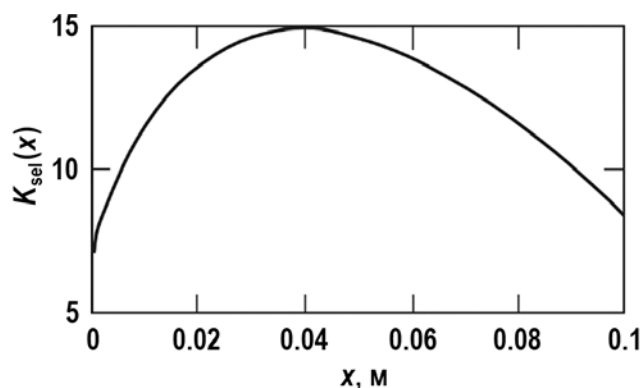


Рис. 2. Эффективность селекции на поверхности элемента вдоль его длины

Эффект реализуется для траекторий, которые начинаются в любой точке поверхности при формировании цепочки отражений луча нейтрона. Таким образом, вся поверхность профилированного подобным образом канала ведет себя как непрерывная поверхность стоков в фазовом (угловом) пространстве диффузного поля нейтронов. Такая совокупность стоков на поверхности интегрирует захваченные нейтроны диффузного поля и выводит их в выделенном кривизной поверхности направлении, при этом концентрируя и увеличивая их фазовую плотность. Селективный захват нейтронов идет вдоль всей ее профилированной поверхности, а вывод идет на узкой, $h_s \approx 5$ микрон, полосе у торца (при хорошо полированной поверхности). Поэтому плотность потока вдоль этой полоски может быть большой.

Если угол поверхностного отражения нейтронов поверхностью равен φ_s , радиус кривизны поверхности – R , путь нейтронов между отражениями $L_s \approx 2R \cdot \sin(\varphi_s) \approx 5$ мм, а расстояние траектории от поверхности канала будет $h_s \approx R(1 - \cos(\varphi_s))$, то коэффициент эффективности захвата нейтронов в ходе селекции

$$K_{sel} = \frac{2R'_x}{\sqrt{1 - y'_x{}^2}}, \quad (2)$$

где y'_x – производная изменения координаты точки на поверхности пластины по x ; R'_x – производная радиуса кривизны R этой поверхности по x в этой точке.

Изменение эффективности селекции K_{sel} поверхности элемента вдоль длины показано на рис. 2.

Для реализации выбирается такая геометрия поверхности селектирующего элемента, чтобы на большей части его поверхности величина K_{sel} была максимальна. Например, у элемента с профилем эллипса $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$ при $a = 150$ мм, $b = 15$ мм максимальная эффективность селекции нейтронов $K_{sel} = 15$ лежит на участке длины от 5 до 100 мм. Для селекции тепловых нейтронов всем объемом структуры необходимо, чтобы выполнялось соотношение

$$N_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_a} \geq \frac{2\pi}{K_{sel}\varphi_s} \frac{\pi}{\omega}, \quad (3)$$

где σ_s, σ_a – сечения рассеяния и поглощения нейтронов; N_s – число последовательных рассеяний теплового нейтрона на ядрах вещества до поглощения; ω – угол расходимости селектированного потока вдоль плоскости селекции.

Но при этом тепловой нейтрон в веществе живет достаточно долго постоянно перерассеиваясь на его ядрах. Число последовательных рассеяний нейтрона на ядрах вещества замедлителя определяется отношением сечения рассеяния нейтрона на ядре к сечению его поглощения этим ядром, например, для графита $N_s = 1.3 \cdot 10^3$ раз. Для пакета пластин из графита [4]

$$N_s = 1.3 \cdot 10^3 \geq \frac{2\pi}{K_{sel}\varphi_s 0.5} \approx 300. \quad (4)$$

Размеры ЗФС должны быть больше длины диффузии нейтронов в ней.

В пределе тепловой нейтрон может быть отсекалирован структурой в выделенном направлении и пройти через фокусную ее область за время жизни примерно четыре раза ($1.3 \cdot 10^3 / 300$).

Или можно сказать, что добротность (или технологическое альbedo) ЗФС из графита больше единицы и может достигать четырёх.

Заметим, что такой эффект селекции возможен только в ЗФС для нейтронов, поскольку тепловые нейтроны диффузного поля в устройстве многократно проходят через поверхности пакета селектирующих пластин и селектируются в нем.

В отличие, например, от фотона диффузного рассеянного источника света, у него в прозрачной такой структуре будет лишь одна попытка пройти через пластины, попасть в угловую область захвата фотонов света структурой и направленно выйти. Эффект будет, яркость сформированной узкой полоски вырастет, но добротность устройства будет мала.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Было проведено три эксперимента с проверкой эффекта селективной сепарации нейтронов на профилированных пластинах [7, 8]. В первом эксперименте четыре раздвинутые селектирующие пластины были выполнены из графита, а кремниевые детектирующие пластины были поставлены поперек формируемого ими потока нейтронов. Во втором и третьем экспериментах селектирующие пластины были выполнены из алюминия, собраны пакетом, а детектирующие кремниевые пластины (две во втором эксперименте и одна в третьем) были поставлены вдоль формируемого ими потока нейтронов, чтобы проанализировать их угловую расходимость. Эксперименты проводились в канале ГЭК-4 на реакторе ИРТ-Т Национального исследовательского Томского политехнического университета [7 – 9].

Реактор – водно-водяной бассейнового типа мощностью 6 МВт, замедлитель – бе-

риллий. Плотность потока тепловых нейтронов составляет $1.0 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, спектральный коэффициент 106. Интегральный поток нейтронов реактора в первом эксперименте составил $\Phi_1 = 3.02 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ [7], во втором эксперименте на пакете пластин $\Phi_2 = 2.9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, а в третьем – $\Phi_3 = 2.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Внешний вид селективирующей пластины из графита в первом эксперименте показан на рис. 3, а пакет селективирующих элементов во втором и третьем экспериментах – на рис. 4.

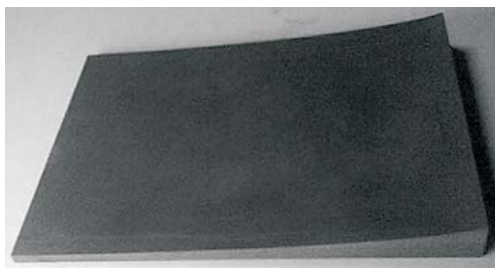


Рис. 3. Внешний вид селективирующей пластины из графита в первом эксперименте

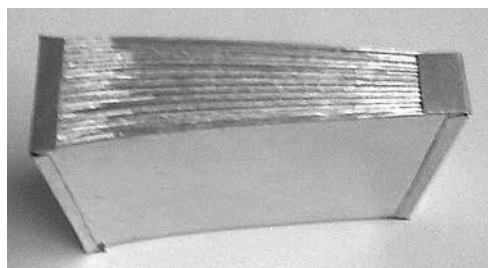


Рис. 4. Внешний вид пакета селективирующих элементов во втором и третьем экспериментах

После облучения в реакторе и спадаания наведенной активности были проведены измерения пластин кремния на кафедре полупроводниковой электроники и физики полупроводников в Национальном исследовательском технологическом университете МИСиС. Работа проводилась на автоматизированной установке ВИК УЭС для измерения удельного электросопротивления (УЭС) полупроводниковых материалов четырехзондовым методом. В первом эксперимента получена следующая картина изменения УЭС кремния на следе потока нейтронов от четырех селективирующих пластин [8].

На рисунке 5 представлен профиль УЭС пластины из первого эксперимента.

Снималась карта УЭС на поверхности пластин с переменным шагом в цилиндрической системе координат. В связи с наличием зависимости между поглощенной интегральной дозой от потока тепловых нейтронов и проводимостью кремния – это эффективный метод измерения поля нейтронов реактора [7]. В эксперименте показано, что полосы повышенной проводимости кремния (а значит, повышенной интенсивности потока нейтронов) находятся в тех районах, где расположены пластины, и проводимость в минимумах следа УЭС совпадает с расчетной.

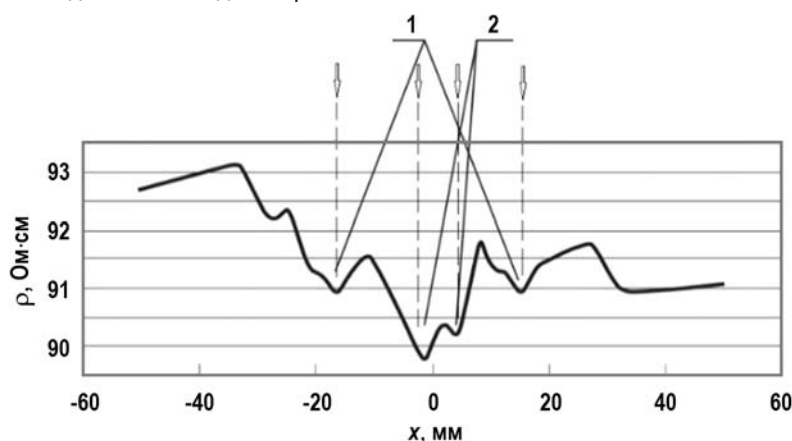


Рис. 5. Профиль изменения УЭС кремния: 1 – след нейтронных потоков от внешних селективирующих пластин с $K_{\text{sel}} = 10$; 2 – след нейтронных потоков от внутренних селективирующих пластин с $K_{\text{sel}} = 15$. Вертикальные пунктирные линии со стрелками выделяют направления потока тепловых нейтронов от четырёх графитовых селективирующих пластин

Во втором и третьем экспериментах использовался пакет из 20-ти алюминиевых

пластин. В этом случае на пакете селективирующих пластин идет сепарация нейтронов внешнего диффузного поля реактора. Для регистрации эффекта во втором случае использовался пакет из двух кремниевых пластин $\varnothing 101.8$ и толщиной 2.4 мм, установленных ребром вдоль направления движения потока нейтронов, в третьем случае – из одной пластины толщиной 4 мм. Селективирующие пластины выполнены из алюминиевой прокатанной ленты (марки А0) толщиной 0.5 и шириной 70 мм с дистанционирующей отбортовкой по краям, сформированной таким образом, чтобы геометрический фокус, в направлении которого пластины ориентируют селективируемые нейтроны, находился на расстоянии 100 мм от края пластин. Профиль селективирующих пластин так же, как и в первом эксперименте, был выбран в виде части эллипса. На рисунке 6 показан вид детектирующих пластин со стороны открытого торца контейнера.

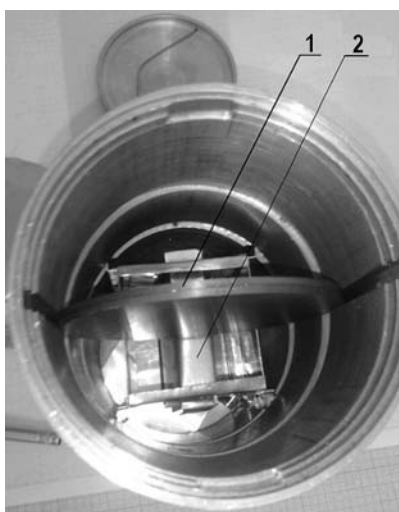


Рис. 6. Внешний вид детектирующих дисков (1) и торца пакета из 20-ти селективирующих пластин (2) в контейнере во втором и третьем экспериментах

На рис. 7 представлена карта распределения УЭС в третьем эксперименте.

Расчетная величина УЭС облученных участков исходного кремния связана с концентрацией носителей N_q , порожденных облучением интегральным потоком нейтронов Φ , соотношением $\rho_{\text{exp}} = (eN_q\mu_n)^{-1}$, где $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ Кл; $\mu_n \approx 1350 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ – подвижность электронов в кремнии при полученной дозе облучения.

Ожидаемое удельное электрическое сопротивление кремния в интегральном потоке нейтронов реактора $\Phi = 3.02 \cdot 10^{17} \pm 3\% \text{ см}^{-2}$ при отсутствии эффекта селекции должно было быть около 96 Ом·см. Это обычно воспроизводится в экспериментах при среднем потоке тепловых нейтронов в реакторе в $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}$ с точностью до $\pm 3\%$.

УЭС на облученных кремниевых пластинах оказалось ниже ожидаемого, а значит, плотность потока отсеleccionированных тепловых нейтронов экспериментальным блоком элементов селективирующей структуры оказалась более высокой.

По результатам измерений проводимости кремния был восстановлен интеграл потока тепловых нейтронов, зарегистрированных на его веществе. При этом

$$\Phi_{\text{exp}} = (e \cdot \rho_{\text{exp}} \cdot \mu_n \cdot n_{\text{Si}} \cdot \sigma_{\text{Si}30} \cdot 0.031)^{-1} \approx \frac{300 \cdot 10^{17}}{\rho_{\text{exp}}} \pm 3\% \left(\frac{1}{\text{см}^2} \right), \quad (5)$$

где n_{Si} – концентрация кремния в пластине; 0.031 – доля изотопа ^{30}Si в природном кремнии; $\sigma_{\text{Si}30}$ – сечение взаимодействия нейтронов с ^{30}Si .

На рис. 8 представлена карта распределения интегрального потока нейтронов.

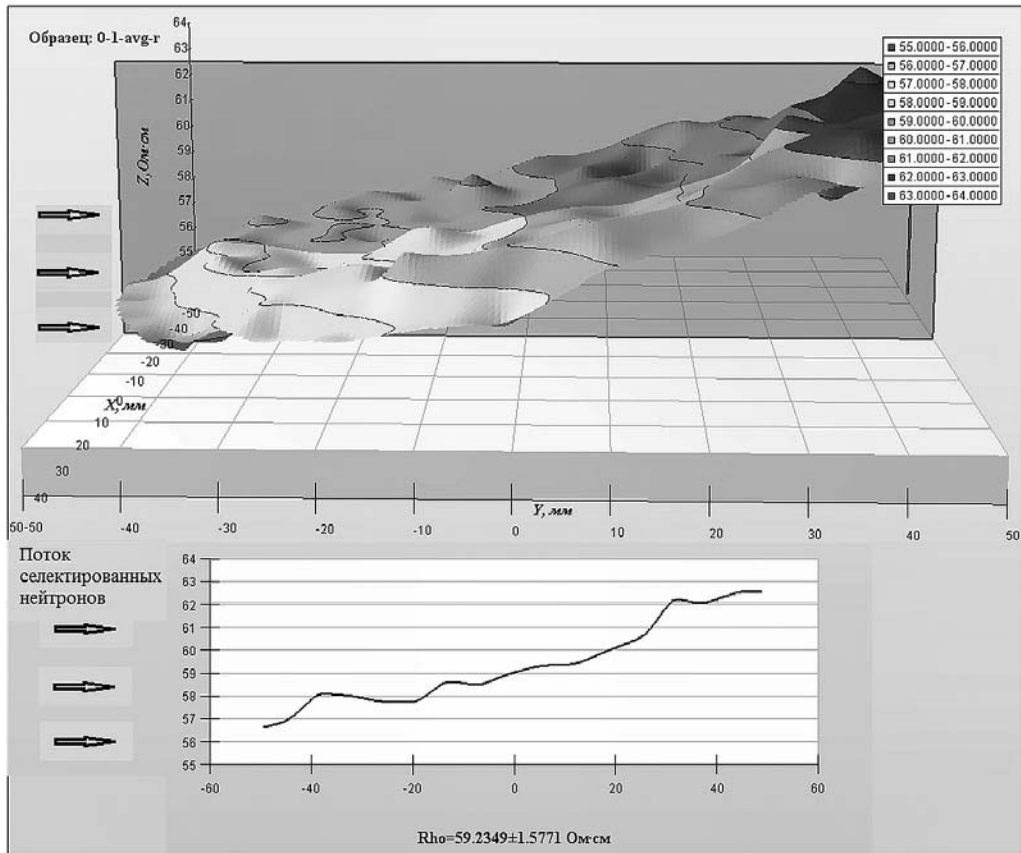


Рис. 7. Карта изменения УЭС вдоль контрольной кремниевой пластины (вверху) и изменение УЭС вдоль контрольной кремниевой пластины (внизу)

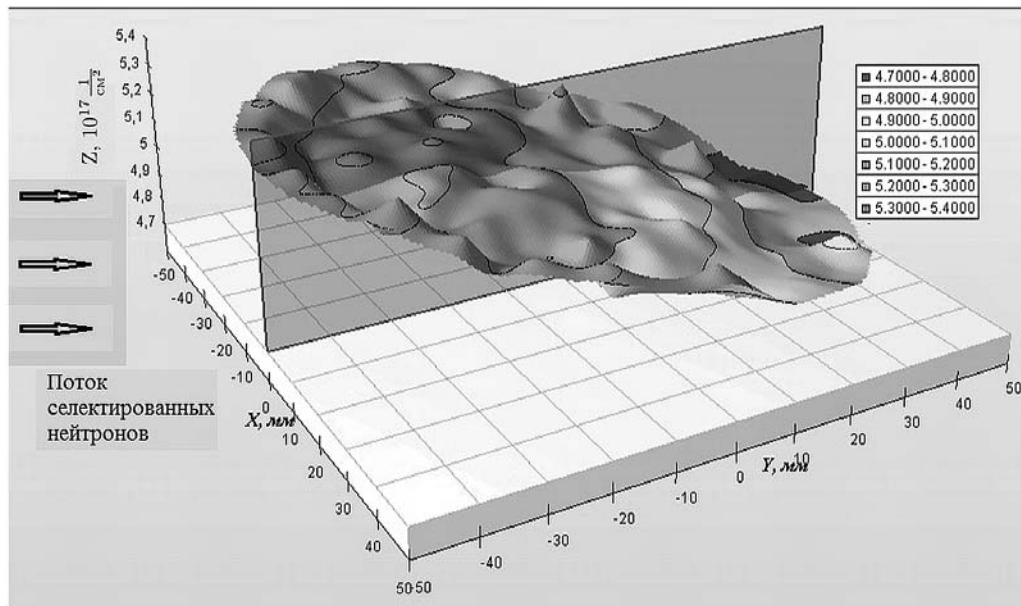


Рис. 8. Изменение интегрального потока тепловых нейтронов, зарегистрированных на контрольной кремниевой пластине

Получено, что поток нейтронов на пластине вырос до величины $\Phi = 5.3 \cdot 10^{17} \pm 3\%$ см⁻² при интегральном потоке поля нейтронов в реакторе $\Phi = 2.3 \cdot 10^{17} \pm 3\%$ см⁻².

Показано, по меньшей мере, двукратное увеличение интегрального потока тепловых нейтронов за счет селективной сепарации нейтронов на пакете из 20-ти селективирующих элементов. Секториальный блок профилированных селективирующих элементов из алюминия составляет 1/45 часть полного цилиндра и имеет длину 70 мм вдоль оси. При полноценной цилиндрической замедляюще-фокусирующей структуре поток тепловых нейтронов был бы в 90 раз больше потока тепловых нейтронов реактора.

Было испытано достаточно простое устройство, в котором плотность в потоке растет, но при этом угловая расходимость пристеночного пучка падает. Формально как бы нарушается теорема Лиувилля для пучков, которую часто трактуют так же, как утверждение что «с помощью оптических устройств – волноводов, линз, зеркал разной формы – нельзя увеличить плотность в фазовом пространстве».

Теорема Лиувилля утверждает сохранение во времени фазового объёма (или плотности вероятности в фазовом пространстве). Она следует из уравнения неразрывности (непрерывности) с отсутствующим слагаемым, описывающим дивергенцию, что означает отсутствие источников или стоков плотности вероятности. Иначе говоря, теорема Лиувилля (в частности, теорема Лиувилля для пучков) сформулирована для систем, в которых истоки и стоки исключены граничными условиями.

Но в ЗФС поверхность каждой из профилированных селективирующих пластин ведет себя как непрерывная поверхность стоков в фазовом (угловом) пространстве диффузного поля тепловых нейтронов, которые и формируют источник направленного потока у торца. И поэтому устройства селективной сепарации нейтронов лежат вне граничных условий теоремы Лиувилля.

Таким образом, нарушения теоремы Лиувилля нет. Но при этом экспериментально доказана возможность создания анизотропных структур, лежащих вне ее формализма, в которых сформированы поверхности стоков тепловых нейтронов из диффузного поля тепловых нейтронов с последующей концентрацией в выделенных структурами областях.

В результате проведенных экспериментов в ядерной технике появился инструмент, который

- в отличие от чисто градиентного управления диффузией нейтронов в обычном реакторе позволяет эффективно управлять потоками тепловых нейтронов; при этом он термализует быстрые нейтроны, создает из диффузного поля тепловых нейтронов направленный поток и эффективно управляет им [13 – 18];

- в связи с высокой эффективностью отражения тепловых нейтронов от зеркальных поверхностей позволяет создать широкий класс различных устройств – для ядерной энергетики, экспериментальной физики [9] и для управляемого нейтронного легирования веществ [10–12].

ВЫВОДЫ

Зарегистрирован эффект селективной сепарации нейтронов на селективирующих элементах из графита и на блоке профилированных пластин из алюминия. Полученные экспериментальные результаты можно использовать в новом поколении ядерных реакторов и термоядерных реакторов, при разработке различных устройств с повышенной плотностью потока тепловых нейтронов, высокоэффективных детекторов нейтронов, а также в создании новых технологий нейтронного легирования полупроводников или в экспериментальной физике. Результаты интересны для разных областей применения плотных нейтронных потоков. В частности, на его основе можно решить такие задачи, как снижение времени набора интегрального потока

тепловых нейтронов на экспериментальных образцах при их размещении в фокусных областях ЗФС.

Литература

1. Kim Y.H., Park H., Kim Y.K., Kim J., Kang J. Reference thermal neutron field at KRISS for calibration of neutron detectors. // Radiation Measurements. – 2017. – Vol. 107. – PP. 73-79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2017.10.001>.
2. Lehmann E., Trtik P., Ridikas D. Status and perspectives of neutron imaging facilities, Neutron imaging for applications in industry and science. // Physics Procedia. – 2017. – Vol. 88. – PP. 140-147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.06.019>.
3. Voffy R., Beaucour J., Bermejo F.J. A Versatile Device for Thermal Neutron Irradiation of Materials at Grazing Incidence Angles. // Nuclear Technology. – 2017. – Vol. 200. – No. 1. – PP. 54-65. DOI: <https://doi.org/10.1080/00295450.2017.1341780>.
4. Варлачев В.А., Зенков А.Г., Солодовников Е.С. Особенности нейтронно-трансмутационного легирования кремния на исследовательских реакторах. // Известия вузов. Физика. – 1998. – № 4. – С. 210-215.
5. Varlachev V.A., Solodovnikov E.S. A Thermal Neutron Detector Based on Single-Crystalline Silicon. // Instruments and Experimental Techniques. – 2009. – Vol. 52. – No. 3. – PP. 342-344. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0020441209030063>.
6. Дробышевский Ю.В., Столбов С.Н. Устройство для формирования направленного потока нейтронов. Патент RU №1821818, 1990 г.
7. Анфимов И.М., Варлачев В.А., Дробышевский Ю.В. Регистрация эффекта селективной сепарации тепловых нейтронов. // ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2018. – № 1. – С. 24-30.
8. Анфимов И.М., Дробышевский Ю.В., Столбов С.Н. Регистрация эффекта селективной сепарации тепловых нейтронов. // Известия Института инженерной физики. – 2018. – Т. 3. – № 49. – С. 21-26.
9. Дробышевский Ю.В., Дунилин В.М., Волков Г.Г., Столбов С.Н. Реакторные нейтрино, структура нейтрона и геометрия пространства-времени. // Известия Института инженерной физики. – 2017. – № 3. – С. 17-28.
10. Варлачев В.А., Зенков А.Г., Солодовников Е.С. Особенности нейтронно-трансмутационного легирования кремния на исследовательских реакторах // Известия вузов. Физика. – 1998. – № 4. – С. 210-215.
11. Варлачев В.А., Солодовников Е.С. Повышение эффективности использования нейтронов при равномерном облучении образцов большой протяженности. // Известия вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 10-2. – С. 313-316.
12. Дробышевский Ю.В., Столбов С.Н., Некрасов С.А., Петров Г.Н., Прохоров А.К. Способ и устройство для нейтронного легирования вещества. Патент RU №2514943, 2012 г. Оpubл. 10.05.2014. Бюл. 13.
13. Бадретдинов Т.Х., Горюнов А.Г., Варлачев В.А. К вопросу о модернизации комплекса нейтронного легирования кремния на ИРТ-Т. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 3. – С. 147-151.
14. Соловьева А.П., Ульянин Ю.А., Харитонов В.В., Юршина Д.Ю. О ценности ОЯТ как сырья для топлива реакторов на тепловых нейтронах. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 2. – С. 140-152; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.2.12>.
15. Ватулин А.В., Супрун В.Б., Кулаков Г.В. Разработка топлива для исследовательских реакторов. // Атомная энергия. – 2015. – Т. 119. – Вып. 5. – С. 249-254.
16. Fischer V., Pagani L., Pickard L., Grant C., He J., Pantic E., Svoboda R., Ullmann J., Wang J. Absolute calibration of the DANCE thermal neutron beam using sodium activation. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2019. – Vol. 929, – Iss. C. – ID: ISSN 0168-9002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.03.047>.
17. Al Zain Jamal, El Hajjaji O., El Bardouni T., Boukha H. Deterministic evaluation of safety parameters and neutron flux spectra in the MNSR research reactor using DRAGON-4 code. //

Journal of Radiation Research and Applied Sciences. – 2018. – Vol. 11. – Iss. 3. – PP. 255-261.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2018.04.002>.

18. *Kerlin Thomas W., Belle R.* Dynamics and Control of Nuclear Reactors. – Elsevier Science, Upadhyaya, Academic Press. – 2019. – 402 p.

Поступила в редакцию 17.06.2020 г.

Авторы

Дробышевский Юрий Васильевич, канд. хим. наук

E-mail: drbshevski@mail.ru

Анфимов Илья Михайлович, инженер

E-mail: ilan@tzirechnoy.com

Варлачев Валерий Александрович, зав. лабораторией, д-р. техн. наук

E-mail: varlachev@tpu.ru

Кобелева Светлана Петровна, д-р. техн. наук

E-mail: kob@misis.ru

Некрасов Сергей Александрович, с.н.с., канд. техн. наук,

E-mail: san693@mail.ru

Столбов Сергей Николаевич, главный инженер

E-mail: stolbovsn@mail.ru

UDC 621.039, 53.05, 53.043

EXPERIMENTAL CONFIRMATION OF A NEW METHOD FOR SELECTIVE NEUTRON SEPARATION

Drobyshevsky Yu.V.*, Anfimov I.M.**, Varlachev V.A.***, Kobeleva S.P.**,
Nekrasov S.A.****, Stolbov S.N.*

* LLC Protius

2 Proezd 4922-th, 124498 Zelenograd, Moscow, Russia

** National Research Technological University MISIS

4 Leninsky Ave., 119049 Moscow, Russia

*** National Research Tomsk Polytechnic University

30 Lenin Ave., 634034 Tomsk, Russia

**** Central Economic and Mathematical Institute, RAS

47 Nakhimov Ave., 117418 Moscow, Russia

ABSTRACT

The article presents an experimental confirmation of the operability of neutron concentrators in devices that form and use directed high-intensity thermal neutron beams with elliptical channels made as blocks of profiled graphite and aluminum plates. The effect of neutron reflection from the surface of materials is the basis of a device capable of selecting neutrons by their directions in space. The study experimentally confirmed the efficiency of a moderating-focusing structure (MFS) based on a pack of elliptical neutron mirrors, which makes it possible to form oriented thermal neutron beams from the outgoing neutron flux. To record the effects of selective thermal neutron separation, silicon single-crystal wafers were used, due to which it was possible to obtain portraits of integral neutron fluxes in the reactor. The experiments were

carried out in a horizontal experimental channel (HEC-4) at the IRT-T reactor of the National Research Tomsk Polytechnic University. The integral neutron flux was $(2.3 - 3.02) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. The neutron flux was detected by the change in the specific electrical resistivity of the single-crystal silicon wafers. The effect of concentration of thermal neutrons was recorded both on the block of graphite neutron mirrors and on the block of aluminum thin-walled elliptical mirrors. In the near future, on this basis, it will be possible to solve such problems as extending the reactor life by reducing the hydrogen uptake in the inner walls. In addition, the experiments have proved the possibility of creating anisotropic structures that lie outside the formalism of Liouville's theorem, in which the surfaces of thermal neutron sinks are formed with subsequent concentration in the areas separated by aluminum or graphite plates.

Key words: thermal neutrons, neutron flux density, thermal neutron beams, elliptical mirror, method and apparatus for investigation thermal neutron beams, neutron transmutation, silicon.

REFERENCES

1. Kim Y.H., Park H., Kim Y.K., Kim J., Kang J. Reference thermal neutron field at KRISS for calibration of neutron detectors. *Radiation Measurements*. 2017, v. 107, pp. 73-79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2017.10.001>.
2. Lehmann E., Trtik P., Ridikas D. Status and perspectives of neutron imaging facilities, Neutron imaging for applications in industry and science. *Physics Procedia*. 2017, v. 88, pp. 140-147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.06.019>.
3. Boffy R., Beaucour J., Bermejo F.J. A Versatile Device for Thermal Neutron Irradiation of Materials at Grazing Incidence Angles. *Nuclear Technology*. 2017, v. 200, no. 1, pp. 54-65. DOI: <https://doi.org/10.1080/00295450.2017.1341780>.
4. Varlachev V.A., Zenkov A.G., Solodovnikov E.S. Features of Neutron Transmutation Doping of Silicon at a Research Reactor. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 1998, no. 4, pp. 210-215 (in Russian).
5. Varlachev V.A., Solodovnikov E.S. A Thermal Neutron Detector Based on Single-Crystalline Silicon. *Instruments and Experimental Techniques*. 2009, v. 52, no. 3, pp. 342-344. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0020441209030063>.
6. Drobyshevskij Yu.V., Stolbov S.N. Device for the Formation of a Directed Neutron Flux. Patent RU №1821818, 1990 (in Russian).
7. Anfimov I.M., Varlachev V.A., Drobyshevskij Yu.V. Registration of Selective Separation Effect of Thermal Neutrons: Substantiation, Experiments. *VANT. Ser. Fizika radiacionnogo vozdeystviya na radioelektronnyu apparaturu*. 2018, no. 1, pp. 24-30 (in Russian).
8. Anfimov I.M., Drobyshevskij Yu.V., Stolbov S.N. Registration of Selective Separation Effect of Thermal Neutrons. *Izvestiya Instituta Inzhenernoj Fiziki*. 2018, v. 3, no. 49, pp. 21-26 (in Russian).
9. Drobyshevskij Yu.V., Dunilin V.M., Volkov G.G., Stolbov S.N. Reactor Neutronics, Neutron Structure and Space-Time Geometry. *Izvestiya Instituta Inzhenernoj Fiziki*. 2017, no. 3, pp. 17-28 (in Russian).
10. Varlachev V.A., Zenkov A.G., Solodovnikov E.S. Features of Neutron Transmutation Doping of Silicon at a Research Reactor. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 1998, no. 4, pp. 210-215 (in Russian).
11. Varlachev V.A., Solodovnikov E.S. Improving the Efficiency of Using Neutrons with Uniform Irradiation of Samples of Large Lengths. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2010, v. 53, no. 10-2, pp. 313-316 (in Russian).
12. Drobyshevskij Yu.V., Stolbov S.N., Nekrasov S.A., Petrov G.N., Prohorov A.K. Method and Device for Neutron Doping of a Substance. Patent RU №2514943, 2012 (in Russian).
13. Badretdinov T.H., Goryunov A.G., Varlachev V.A. On the Issue of Upgrading the Complex for Neutron Doping of Silicon at IRT-T. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Yadernaya Energetika*. 2010, no. 3, pp. 147-151 (in Russian).
14. Solov'eva A.P., Ul'yanin Yu.A., Haritonov V.V., Yurshina D.Yu. On the Value of Spent Nuclear Fuel as a Feedstock for Thermal Reactors' Fuel. *Izvestiya vuzov. Yadernaya*

Energetika. 2019, no. 2. pp. 140-152. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.2.12> (in Russian).

15. Vatulin A.V., Suprun V.B., Kulakov G.V. Development of Fuel for Research Reactors. *Atomnaya Energiya*. 2015, v. 119, no. 5, pp. 249-254 (in Russian).

16. Fischer V., Pagani L., Pickard L., Grant C., He J., Pantic E., Svoboda R., Ullmann J., Wang J. Absolute calibration of the DANCE thermal neutron beam using sodium activation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2019, v. 929, iss. C, ID: ISSN 0168-9002. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.03.047>.

17. Al Zain Jamal, El Hajjaji O., El Bardouni T., Boukha H. Deterministic evaluation of safety parameters and neutron flux spectra in the MNSR research reactor using DRAGON-4 code. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. 2018, v. 11, iss. 3, pp. 255-261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2018.04.002>.

18. Kerlin Thomas W., Belle R. *Dynamics and Control of Nuclear Reactors*. Elsevier Science, Upadhyaya, Academic Press, 2019. 402 p.

Authors

Drobyshevsky Yury Vasilyevich, Cand. Sci. (Chemistry)

E-mail: drbshevski@mail.ru

Anfimov Ilya Mikhailovich, Engineer

E-mail: ilan@tzirechnoy.com

Varlachev Valery Aleksandrovich, Head of Lab, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: varlachev@tpu.ru

Kobeleva Svetlana Petrovna, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: kob@misis.ru

Nekrasov Sergey Aleksandrovich, Senior Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: san693@mail.ru

Stolbov Sergey Nikolaevich, Senior Engineer

E-mail: stolbovsn@mail.ru