

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.039+53.05+53.043

АНИЗОТРОПНЫЕ СТРУКТУРЫ ДЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПОТОКОВ ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ

© 2021 г. Ю. В. Дробышевский^а, И. М. Анфимов^б, В. А. Варлачев^с, С. П. Кобелева^б,
С. А. Некрасов^{а,*}, С. Н. Столбов^а

^а ООО “Протиус”

Россия, 124498, Москва, Зеленоград, проезд 4922-й, 2, стр. 6

^б Национальный исследовательский технологический университет МИСиС
Россия, 119049, Москва, Ленинский просп., 4

^с Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Россия, 634034, Томск, просп. Ленина, 30

^д Центральный экономико-математический институт РАН
Россия, 117418, Москва, Нахимовский просп., 47

*e-mail: san693@mail.ru

Поступила в редакцию 07.06.2020 г.

После доработки 26.06.2020 г.

Принята к публикации 29.06.2020 г.

Подготовлен и выполнен эксперимент по доказательству возможности создания анизотропных структур, в которых сформированы поверхности стоков тепловых нейтронов с последующей концентрацией в выделенных областях. В основу устройства, обладающего способностью проводить селекцию нейтронов по направлению в пространстве, положен эффект отражения нейтронов от поверхности материалов. 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. Экспериментально проверена работоспособность конструкции замедляюще-фокусирующей структуры на базе пакета нейтронных зеркал эллиптической формы, которая позволяет формировать ориентированные пучки тепловых нейтронов из выходящего потока нейтронов реактора. Были использованы кремниевые монокристаллические пластины, применение которых позволяет получать распределения интегральных потоков нейтронов в реакторе с целью регистрации эффекта селективной сепарации тепловых нейтронов. Эксперименты проводили в канале ГЭК-4 на реакторе ИРТ-Т Национального исследовательского Томского политехнического университета. Интегральный поток нейтронов составил $(2.3\text{--}3.02) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$. Нейтронный поток детектировали по изменению удельного электросопротивления пластин монокристаллического кремния. Эффект концентрирования тепловых нейтронов зарегистрирован как на блоке графитовых нейтронных зеркал, так и на блоке алюминиевых тонкостенных эллиптических зеркал.

DOI: 10.31857/S0032816221010079

Целью данной 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 измерять распределения 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 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 и получать “карты распределения” или “фотографии распределения” потоков тепловых нейтронов в условиях стандартных реакторных

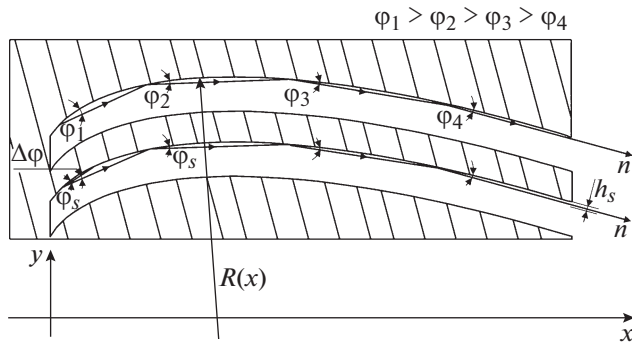


Рис. 1. Селектирование нейтронов в криволинейных каналах селекции. φ_1 — угол падения-отражения нейтрона к поверхности при i — 1-отражении; $\varphi_2 \leq \varphi_s$; φ_1 — угол к поверхности селектирующего элемента для первичного входа нейтрона n ; $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_s$; h_s — толщина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

полей с приемлемой точностью. И в отличие от активационных детекторов кремниевые детекторы обладают свойством долговременной памяти.

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.

Этот угол равен $\varphi_s = 10^\circ$ для поверхности графита, $\varphi_s = 12^\circ$ — бериллия, $\varphi_s = 10.7^\circ$ — железа, $\varphi_s = 11.5^\circ$ — никеля, $\varphi_s = 9.5^\circ$ — меди, $\varphi_s = 5.0^\circ$ — алюминия [6].

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

$$n^2 = 1 - \frac{\lambda^2}{\pi} N b \pm \frac{\mu B}{E_n},$$

где $\lambda = h/m_n v_n$ — дебройлевская длина волны нейтрона со скоростью v_n ; N — концентрация ядер; b — длина когерентного рассеяния ядер вещества.

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

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.

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, $h_s \approx 5$ мкм, полосе у торца (при хорошо полированной поверхности). Поэтому плотность потока вдоль этой полосы может быть большой.

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

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

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.

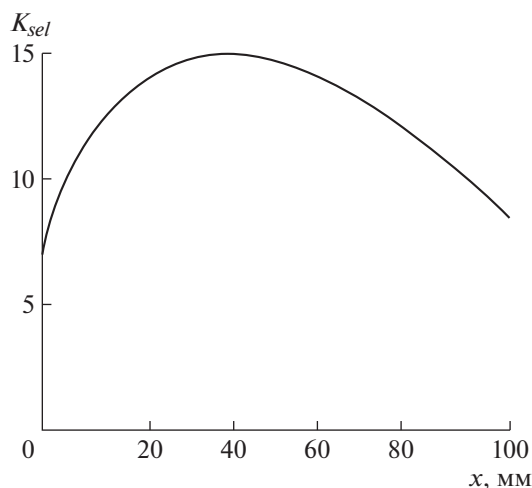


Рис. 2. Зависимость эффективности селекции нейтронов на поверхности элемента вдоль его длины.

Эффективность селекции K_{sel} на поверхности элемента вдоль его длины показана на рис. 2.

Для реализации выбирается такая геометрия поверхности селектирующего элемента, чтобы на большей части его поверхности величина K_{sel} была максимальной. Например, у элемента с профилем эллипса: $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$, где $a = 150$ мм, $b = 15$ мм, мак-

симальная эффективность селекции нейтронов $K_{sel} = 15$ и лежит на участке длины от 5 до 100 мм. Для селекции тепловых нейтронов всем объемом структуры необходимо, чтобы

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

где σ_s и 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 эта величина составляет: $N_s = 1.3 \cdot 10^3$ раз.

Для пакета пластин из графита [4]:

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

Размеры з.ф.с. должны быть больше длины диффузии нейтронов в ней.

В пределе тепловой нейтрон может быть отсе- лектирован структурой в выделенном направле-



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

нии и пройти через фокусную ее область за время жизни до $1.3 \cdot 10^3 / 300 \approx 4$ раз.

Или можно сказать, что добротность, или технологическое альbedo, з.ф.с. из графита больше единицы и может достигать 4.

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

Было проведено три эксперимента с проверкой эффекта селективной сепарации нейтронов на профилированных пластинах [7, 8]. В первом эксперименте 4 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]. Реактор — водно-водяной бассейнового типа мощностью 6 МВт, замедлитель — бериллий. 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 эксперименте $\Phi_3 = 2.3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

Внешний вид селектирующей пластины из графита в первом эксперименте показан на рис. 3,

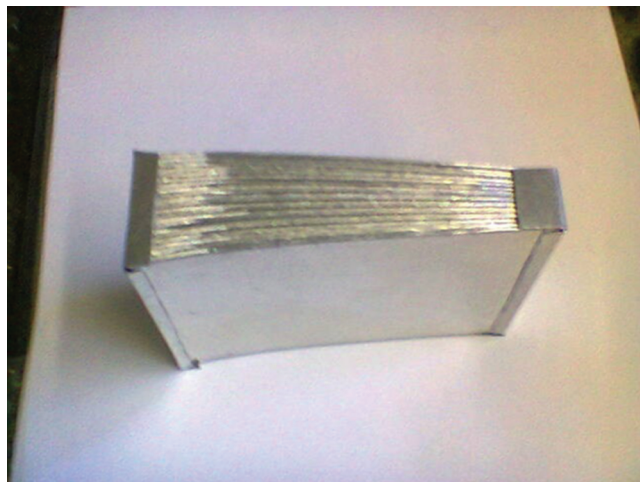


Рис. 4. Внешний вид пакета селективирующих элементов во втором и третьем экспериментах.

а пакета селективирующих элементов во втором и третьем экспериментах — на рис. 4.

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 (у.э.с.) полупроводниковых материалов четырехзондовым методом. В первом эксперименте получена следующая картина изменения у.э.с. кремния на следе потока нейтронов от четырех селективирующих пластин [8].

На рис. 5 представлен профиль у.э.с. пластины из первого эксперимента.

Снималась карта у.э.с. 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 у.э.с. совпадает с расчетной.

Во втором и третьем экспериментах использовался пакет из 20 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 ней-

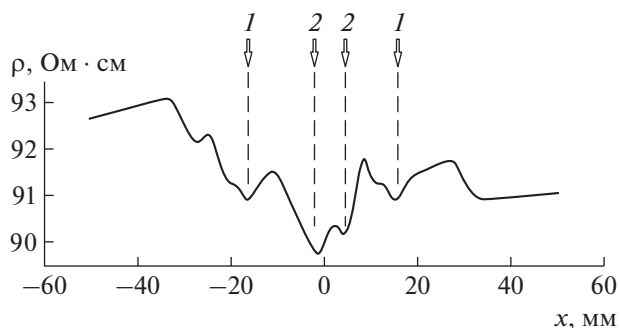


Рис. 5. Профиль изменения у.э.с. кремния: 1 — след нейтронных потоков от внешних селективирующих пластин с $K_{sel} = 10$; 2 — след нейтронных потоков от внутренних селективирующих пластин с $K_{sel} = 15$. Вертикальные пунктирные линии со стрелками выделяют направления потока тепловых нейтронов от четырех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

тронов, 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 рис. 6 показан вид детектирующих пластин со стороны открытого торца контейнера.



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

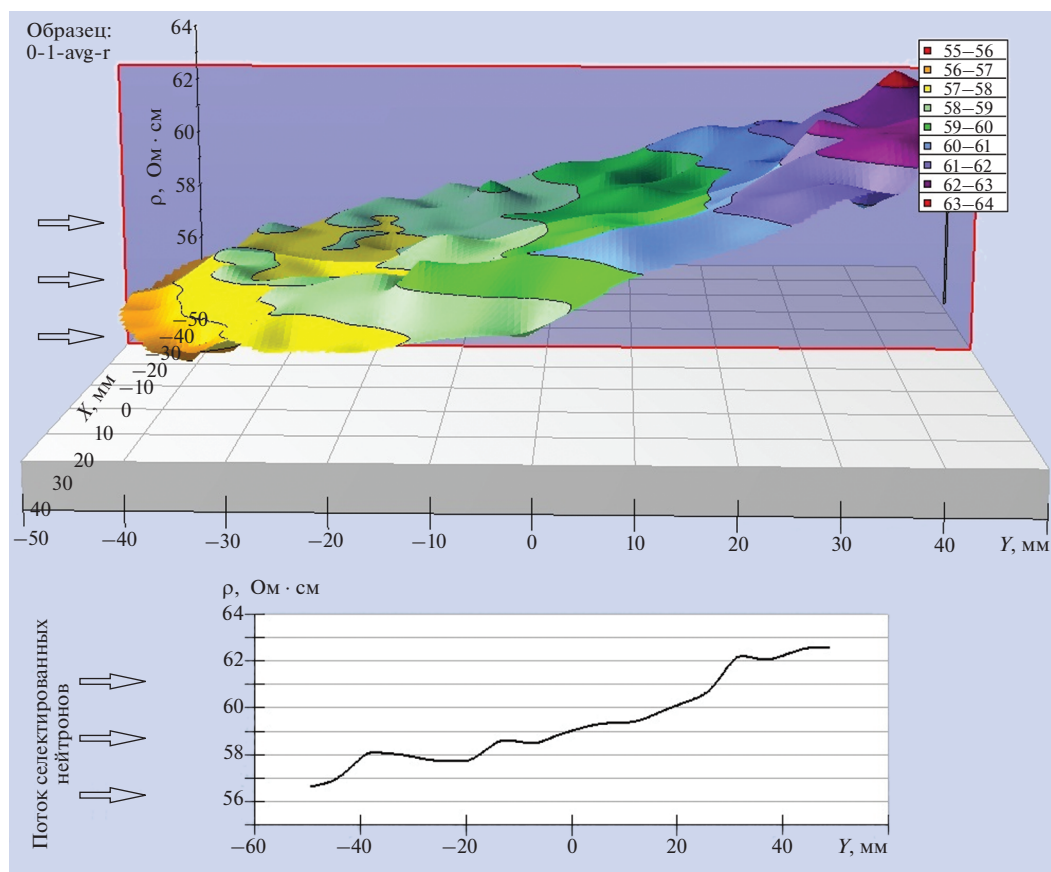


Рис. 7. Карта изменения у.э.с. вдоль контрольной кремниевой пластины (вверху) и изменение у.э.с. вдоль контрольной кремниевой пластины (внизу).

На рис. 7 представлена карта распределения у.э.с. в третьем эксперименте.

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

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

У.э.с. на облученных кремниевых пластинах оказалось ниже ожидаемого, а значит, плотность потока отсеleктированных тепловых нейтронов экспериментальным блоком элементов селектирующей структуры оказалась более высокой.

По результатам измерений проводимости кремния был восстановлен интеграл потока зарегистрированных тепловых нейтронов.

При этом

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

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

На рис. 8 представлена карта распределения интегрального потока нейтронов.

Показано, по меньшей мере, двукратное увеличение интегрального потока тепловых нейтронов за счет селективной сепарации нейтронов на пакете из 20 селектирующих элементов. Секторный блок профилированных селектирующих элементов из алюминия составляет 1/45 часть полного цилиндра и имеет длину 70 мм вдоль оси. И при полноценной цилиндрической з.ф.с. поток тепловых нейтронов был бы в 90 раз больше потока тепловых нейтронов реактора.

В результате проведенных экспериментов в ядерной технике появился инструмент, который:

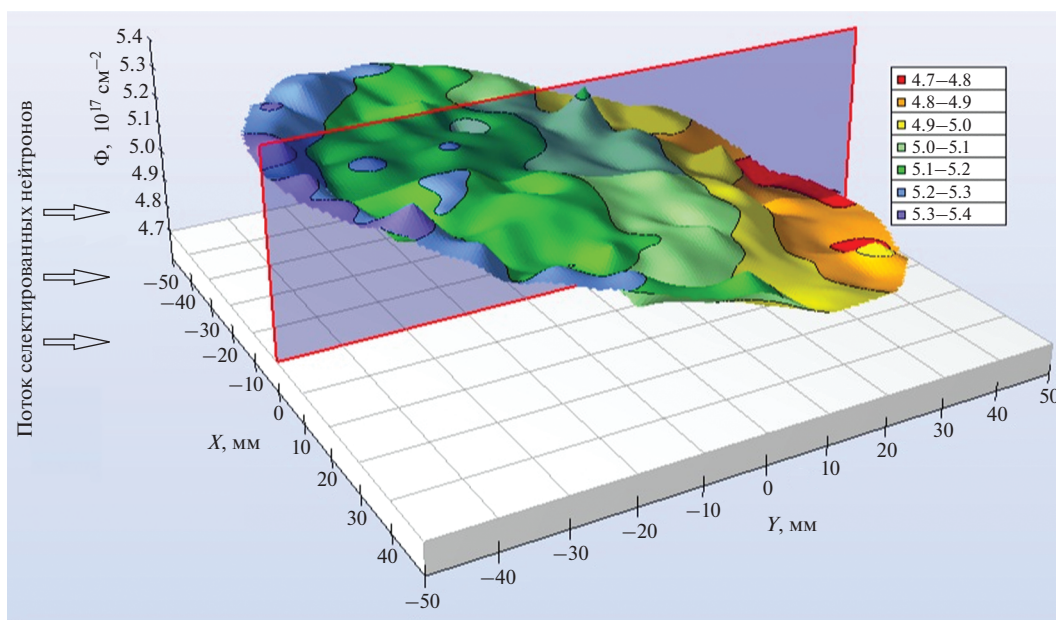


Рис. 8. Изменение интегрального потока тепловых нейтронов, зарегистрированных на контрольной кремниевой пластине. Получено, что поток нейтронов на пластине вырос до величины $\Phi = 5.3 \cdot 10^{17} \pm 3\% \text{ см}^{-2}$ при интегральном потоке поля нейтронов в реакторе $\Phi = 2.3 \cdot 10^{17} \pm 3\% \text{ см}^{-2}$.

— во-первых, 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;

— во-вторых, в связи с высокой эффективностью отражения тепловых нейтронов от зеркальных поверхностей возможно создание широкого класса различных устройств для экспериментальной физики [9] и для управляемого нейтронного легирования веществ [10–12].

ВЫВОДЫ

Зарегистрирован эффект селективной сепарации нейтронов на селектирующих 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 и 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 з.ф.с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kim Y.H., Park H., Kim Y.K., Kim J., Kang J. // Radiation measurements. 2017. V. 107. P. 73.
2. Lehmann E., Triik P., Ridikas D. // Physics Procedia. 2017. V. 88. P. 140.
3. Boffy R., Beaucour J., Bermejo F.J. // Nuclear technology. 2017. V. 200. № 1. P. 54.
4. Варлачев В.А., Зенков А.Г., Солодовников Е.С. // Изв. вузов. Физика. 1998. № 4. С. 210.
5. Варлачев В.А., Солодовников Е.С. // ПТЭ. 2009. № 3. С. 35.
6. Дробышевский Ю.В., Столбов С.Н. А.с. № 1821818 СССР. 1990.
7. Анфимов И.М., Варлачев В.А., Дробышевский Ю.В. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2018. № 1. С. 24.
8. Анфимов И.М., Дробышевский Ю.В., Столбов С.Н. // Изв. Института инженерной физики. 2018. Т. 3. № 49. С. 21.
9. Дробышевский Ю.В., Дунилин В.М., Волков Г.Г., Столбов С.Н. // Изв. Института инженерной физики. 2017. № 3. 2017. С. 17–28.
10. Варлачев В.А., Зенков А.Г., Солодовников Е.С. // Изв. вузов. Физика. 1998. № 4. С. 210.
11. Варлачев В.А., Солодовников Е.С. // Изв. вузов. Физика. 2010. Т. 53. № 10-2. С. 313.
12. Петров Г.Н., Прохоров А.К., Гуцин В.В., Дробышевский Ю.В., Столбов С.Н., Некрасов С.А. Патент на изобретение 2514943 РФ // Оpubл. 10.05.2014. Бюл. 13.