

УДК 621.039.8.003

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ В ОБЛУЧАТЕЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ С КАДМИЕВЫМ ЭКРАНОМ

¹⁾ Ота А., ²⁾ Айткулов М., ²⁾ Дюсамбаев Д., ²⁾ Гизатулин Ш., ²⁾ Кенжин Е.,
¹⁾ Каназава Х., ²⁾ Романова Н., ²⁾ Шаймерденов А., ¹⁾ Кавамура Х.

¹⁾ Chiyoda Technol Corporation, Tokyo, Japan

²⁾ Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

Неравномерность (высотная и радиальная) распределения нейтронного поля в активной зоне, в том числе и в облучательных каналах исследовательских реакторов, является одной из важных задач, которую необходимо решать при нейтронно-трансмутационном легировании полупроводников. С 2017 года на критическом стенде Института ядерной физики (г. Алматы, Республика Казахстан) совместно с Chiyoda Technol Corporation (Япония) ведутся работы по разработке облучательного устройства с максимальным сглаживанием высотной неравномерности. На сегодня разработанное устройство позволяет снизить высотную неравномерность с 18% до 4%.

В настоящей работе приведены методики измерения высотного распределения плотности потока нейтронов и результаты экспериментов на критическом стенде. Для поглощения тепловых нейтронов использовался кадмий. Облучательное устройство имеет кадмиевый экран, который был сформирован из колец кадмия толщиной 0,5 мм и высотой от 3 мм до 5 мм.

Ключевые слова: реактор ВВР-К, кремний, облучательное устройство.

ВВЕДЕНИЕ

Кремний широко используется в полупроводниковой промышленности, как материал для изготовления электронных и оптоэлектронных устройств. Одним из методов легирования кремния и создание в нем n-типа проводимости является нейтронно-трансмутационное легирование (НТЛ). При помощи этого метода можно получить более равномерное легирование слитков кремния по сравнению с другими методами (диффузионный и имплантационный). Кристаллы кремния с неоднородными свойствами делают нестабильные силовые устройства, что приводит к их быстрому выходу из строя. Для реализации НТЛ кремния необходим интенсивный источник тепловых нейтронов. На многих стационарных исследовательских реакторах налажена эта методика.

С 2017 года на критическом стенде Института Ядерной Физики г. Алматы (Республика Казахстан) совместно с Chiyoda Technol Corporation (Япония) ведутся научно-исследовательские работы по адаптации НТЛ кремния большого размера в реакторе ВВР-К. На первом этапе работ было разработано облучательное устройство для облучения слитков кремния диаметром 6 дюймов. Основным требованием к конструкции устройства являлось обеспечение однородности легирования кремния, высотная составляющая, которой обеспечивалась за счет использования кадмиевого экрана для выравнивания аксиальной плотности потока нейтронов внутри устройства, а радиальная составляющая – за счет вращения устройства вокруг своей оси.

Разработанное устройство предназначено для проведения легирования слитков кремния диаметром 152 мм и высотой 500 мм в вертикальном облучательном канале реактора ВВР-К, диаметром 200 мм и

получения неоднородности легирования на уровне 4%. [1]

В настоящей работе было подробно исследовано влияние кадмиевого экрана на высотное распределение плотности потока нейтронов в облучательном устройстве.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперименты проведены на критическом стенде, где предварительно была сформирована конфигурация активной зоны реактора ВВР-К [2, 3]. Одним из назначений критического стенда является моделирование активных зон легководных реакторов [4]. Активная зона критической сборки состояла из 24 ТВС и 10 бериллиевых блоков. Картограмма загрузки представлена на рисунке 1.

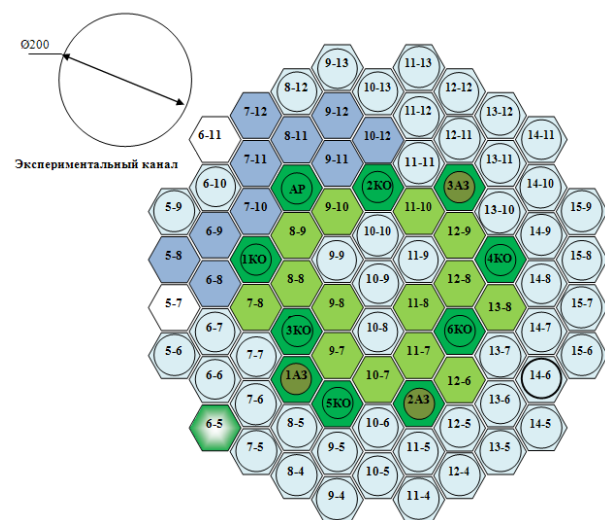


Рисунок 1. Картограмма загрузки активной зоны критического стенда

Для экспериментального определения параметров поля нейтронов в облучательном устройстве использовались активационные фольги из золота и малогабаритный борный счётчик нейтронов. Активация фольг происходила по следующей ядерной реакции: $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$. Далее фольги исследовались на полупроводниковом гамма-спектрометре. Активной частью счётчика нейтронов является борный радиатор, на котором протекает следующая ядерная реакция: $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$.

Активационные измерения проводились без кадмиевых фильтров и результаты измерений представлены в относительных единицах, нормированные на максимальное значение. Погрешность измерения нейтронным счётчиком составляла $<2\%$ и для измерений с активационными фольгами $<8\%$.

Слиток кремния моделировался алюминиевым блоком с внешним диаметром 152,4 мм и высотой 500 мм. В блоке имеются 5 сквозных отверстий для размещения в них фольг из золота и борного счётчика. Фотография алюминиевого блока и его торцевое сечение представлены на рисунке 2, где числа 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют номерам сквозных отверстий в блоке.

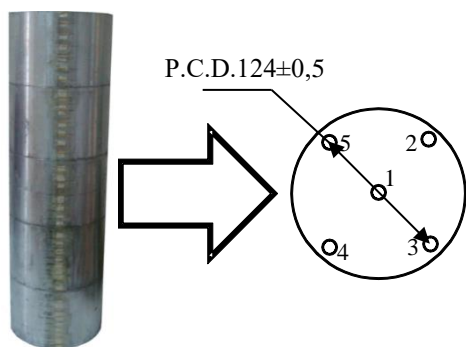


Рисунок 2. Фотография и горизонтальное сечение алюминиевого блока

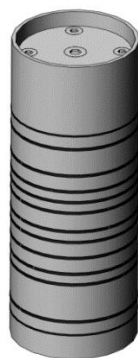


Рисунок 3. Облучательное устройство с экраном из кадмия

Блок помещался в облучательное устройство с экраном из кадмия (рисунок 3) и после чего устройство загружалось в облучательный канал. При облучении, центральная плоскость блока совпадала с центральной плоскостью активной зоны.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Неравномерность распределения поля нейтронов определялась коэффициентом неравномерности, как отношение $K_H = \frac{F_{\max}}{\bar{F}}$, где F_{\max} – максимальный поток нейтронов, среднее значение потока нейтронов. \bar{F} – среднее значение потока нейтронов.

На рисунках 4–5 показаны высотные распределения плотности потока нейтронов в алюминиевом блоке.

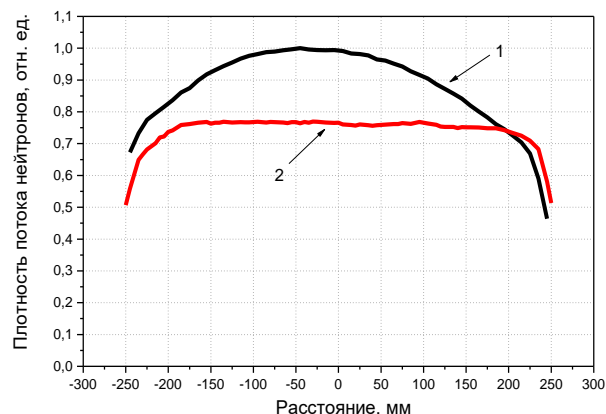


Рисунок 4. Высотное распределение плотности потока тепловых нейтронов в алюминиевом блоке (в центральной отверстии)

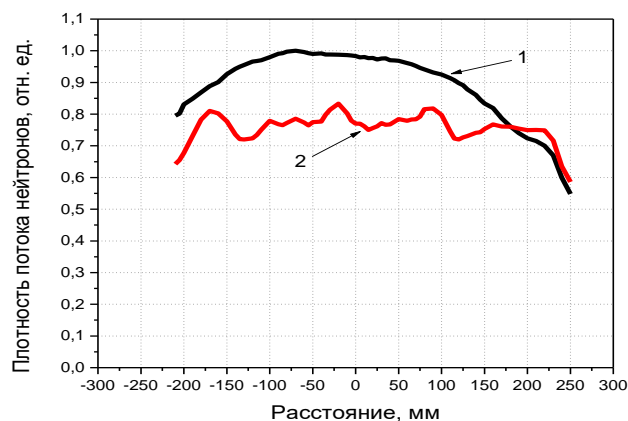


Рисунок 5. Высотное распределение плотности потока тепловых нейтронов в алюминиевом блоке (в ближайшем к активной зоне отверстию)

Измерения проведены с помощью малогабаритного счётчика нейтронов. Кривая 1 соответствует измерениям в облучательном устройстве без кадмиевого экрана, а кривая 2 – в устройстве с кадмиевым экраном. Непрерывное измерение профиля нейтронов проводилось протяжкой нейтронного счётчика по высоте блока при фиксированном уровне мощности критической сборки. Высота активной части счётчика составляет 40 мм. Разработанное облучательное устройство позволило снизить высотный коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов в

блоке. В центральной отверстии блока, высотный коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов был снижен с 13,9% до 3,9%. В ближайшем к активной зоне отверстии, высотный коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов был снижен с 10,5% до 8,5%. Анализ рисунков 4 и 5 показал, что в алюминиевом блоке происходит дополнительное выравнивание высотного профиля нейтронов.

На рисунке 6 показано высотное распределение плотности потока нейтронов в алюминиевом блоке без его вращения (кривая 1, $K_H \sim 15,3\%$) и с вращением (кривая 2, $K_H \sim 12,5\%$) блока. Измерения проведены с использованием золотых фольг. Ширина фольги 2 мм, а ее длина 15 мм. Количество активационных детекторов – 50 шт. На графике отчетливо видны всплески потока нейтронов между кадмиевыми кольцами и провалы за кадмиевыми кольцами. Всплески потока нейтронов также наблюдаются на торцах блока (граница алюминий-вода).

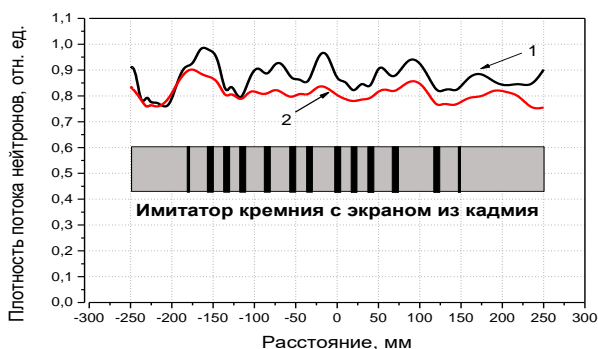


Рисунок 6. Высотное распределение плотности потока тепловых нейтронов алюминиевом блоке в ближайшем к активной зоне отверстию

ЛИТЕРАТУРА

1. Romanova N., Gizatuln Sh., Dyussambayev D., Shaimerdenov A., Aitkulov M. and Kenzhin Ye. Calculated and experimental studies at critical facility in view of development of a technology for neutron transmutation doping of a large size silicon specimen in WWR-K reactor / Journal of Physics: Conf. Series 1115 (2018) 032052.
2. Аринкин Ф.М., Шаймерденов А.А., Гизатулин Ш.Х., Дюсамбаев Д.С., Колточник С.Н., Чаков П.В., Чекушина Л.В. Конверсия активной зоны исследовательского реактора ВВР-К. – Атомная энергия, 2017, т. 123, № 1 – С. 15–20.
3. A. A. Shaimerdenov, D. A. Nakipov, F. M. Arinkin, Sh. Kh. Gizatuln, P. V. Chakrov, and Ye. A. Kenzhin The 50th Anniversary of the WWR-K Research Reactor // Physics of Atomic Nuclei, 2018, Vol. 81, No. 10, pp. 1408–1411.
4. А. А. Шаймерденов, Ф.М. Аринкин, Ш.Х. Гизатулин, Д.С. Дюсамбаев, С.Н. Колточник, П.В. Чаков, Л.В. Чекушина, И.В. Шаманин Пуск и нейтронно-физические характеристики критического стенда РГП «Институт ядерной физики» РК с низкообогащенной активной зоной // Альтернативная энергетика и экология, № 23 (187), стр. 51–59, – Саров, Россия – 2015.

Коэффициент неравномерности плотности потока нейтронов по высоте блока измеренный двумя методами отличается друг от друга (8,5% и 12,5%). Это объясняется тем, что счетчик нейтронов измеряет интегральную характеристику поля нейтронов по всему рабочему объему, а золотые фольги можно считать точечным детектором. Также влияние оказывает разная зависимость сечения поглощения нейтронов от энергии налетающих нейтронов в вышеперечисленных ядерных реакциях.

Выводы

Исследовано подробное высотное распределение плотности потока нейтронов в алюминиевом блоке диаметром 6 дюймов и высотой 500 мм.

Разработанное облучательное устройство с кадмиевым экраном обеспечит однородность легирования кремния по высоте слитка на уровне 4% при разбивке слитка на диски высотой 40 мм.

Далее научно-исследовательские работы должны быть направлены на совершенствование конструкции облучательного устройства с целью получения более однородного легирования кремния большого размера. Расстояние между исследуемыми точками должно быть примерно 1–5 мм.

Необходимо рассмотреть другие материалы для использования в качестве поглотителей нейтронов, а также рассмотреть другие методы сглаживания высотной неравномерности плотности потока нейтронов. Например, метод инверсии или поступательного перемещения по высоте активной зоны во время облучения слитка.

**КАДМИЙ ЭКРАНЫ БАР СӘУЛЕЛЕНДІРУ ҚҰРЫЛҒЫСЫНДА НЕЙТРОНДАР АҒЫНЫНЫҢ
ТЫҒЫЗДЫҒЫН БИІКТІГІ БОЙЫНША ТАРАЛУЫН ЗЕРТТЕУ**

¹⁾ А. Ота, ²⁾ М. Айтқұлов, ²⁾ Д. Дюсамбаев, ²⁾ Ш. Гизатулин, ²⁾ Е. Кенжин,
¹⁾ Х. Каназава, ²⁾ Н. Романова, ²⁾ А. Шаймерденов, ¹⁾ Х. Кавамура

¹⁾ *Chiyoda Technol Corporation, Tokyo, Japan*
²⁾ *Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан*

Зерттеу реакторларының белсенді аймағы мен сәулелендіру каналдарындағы нейтрондар өрісі таралуының әркелкілігі (биіктігі бойынша және радиалдық) жартылай өткізгіштерді нейтрондық-трансмутациялық қоспалау кезінде шешілуі қажетті маңызды міндеттердің бірі болып табылады. 2017 жылдан бастап ҚР Алматы қаласы Ядролық Физика Институтының сындық стендінде Chiyoda Technol Corporation (Жапония) бірлесе отырып биіктіктегі әркелкілікті максималды түрде түзетуге мүмкіндік тудыратын сәулелендіру құрылғысын әзірлеу бойынша жұмыстар жүргізіліп жатыр. Бүгінгі таңда әзірленген құрылғы биіктіктегі әркелкілікті 18%-дан 4%-ға дейін төмендетуге мүмкіндік берді.

Осы жұмыста нейтрондар өрісі тығыздығының биіктік бойынша таралуын өлшеу және сындық стендте қойылған эксперименттердің нәтижелері ұсынылған. Жылулық нейтрондарды жұту үшін кадмий пайдаланылды. Сәулелендіру құрылғысы қалыңдығы 0,5 мм және биіктігі 3 мм-ден 5 мм-ке дейін жететін кадмий жолақтарынан құралған кадмий экранынан тұрады.

Кілт сөздер: ССР-Қ реакторы, кремний, сәулелендіру құрылғысы.

**STUDY OF THE AXIAL NEUTRON FLUX DISTRIBUTION IN THE IRRADIATION DEVICE
WITH A CADMIUM-SCREEN**

¹⁾ A. Ota, ²⁾ M. Aitkulov, ²⁾ D. Dyussambayev, ²⁾ Sh. Gizatulin, ²⁾ Ye. Kenzhin,
¹⁾ H. Kanazawa, ²⁾ N. Romanova, ²⁾ A. Shaimerdenov, ¹⁾ H. Kawamura

¹⁾ *Chiyoda Technol Corporation, Tokyo, Japan*
²⁾ *Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan*

Non-uniform distribution (both vertical and radial) of the neutron field in the reactor core of the research reactors is one of the most important task to solve in the process of neutron-transmutation doping of semiconductors. Since 2017, using the critical facility, the Institute of Nuclear Physics (Republic of Kazakhstan), in cooperation with c Chiyoda Technol Corporation (Japan), has been developing an irradiation device for the maximally reduce axial non-uniformity factor of the thermal neutron flux. The developed device allows to reduce the axial non-uniformity factor from 18% to 4%.

The present work shows the methods to measure axial distribution of the neutron flux density, and the results of the experiments conducted on the critical facility. Cadmium was used for thermal neutron absorption. The irradiation device has a cadmium-screen formed of cadmium rings 0,5 mm wide and from 3 mm to 5 mm high.

Keywords: WWR-K reactor, silicon, irradiation device.