

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ РАВНОМЕРНОГО НЕЙТРОННОГО ПОЛЯ

Ж.Т. Бугыбай, Н.К. Романова, Ш.Х. Гизатулин, М.Т. Айткулов, А.А. Шаймерденов
*РГП на ПХВ «Институт ядерной физики» Министерства энергетики
Республики Казахстан,
ул. Ибрагимова 1, Алматы 050032, Республика Казахстан,
zh.bugybay@inp.kz, romanova@inp.kz, sgizatulih@inp.kz, maitkulov@inp.kz,
ashaimerdenov@inp.kz*

В настоящей работе приведены результаты расчётно-экспериментальных исследований по моделированию нейтронно-физических характеристик облучательного устройства, которое предназначено для формирования равномерного нейтронного поля при облучении крупногабаритных слитков кремния. Предварительные исследования показали необходимость формирования специальных условий облучения для таких объектов. Расчёты и эксперименты на критическом стенде показали возможность получения приемлемой неравномерности распределения нейтронного потока по объёму слитка.

Ключевые слова: облучательное устройство; легирование кремния; ВВР-К реактор; плотность потока нейтронов; неравномерность потока нейтронов.

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL SUMULATION OF THE IRRADIATION DEVICE DESIGNED TO FORM A UNIFORM NEUTRON FIELD

Zh.T. Bugybay, N.K. Romanova, Sh.H. Gizatulin, M.T. Aitkulov, A.A. Shaimerdenov
*Institute of Nuclear Physics of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan
1 Ibragimov Str., 050032 Almaty, Kazakhstan,
zh.bugybay@inp.kz, romanova@inp.kz, sgizatulih@inp.kz, maitkulov@inp.kz,
ashaimerdenov@inp.kz*

This paper presents the results of computational and experimental studies on modeling the neutron-physical characteristics of an irradiation device, which is designed to form a uniform neutron field during the irradiation of large-sized silicon ingots. Preliminary studies have shown the need to create special irradiation conditions for such objects. Calculations and experiments on the critical facility showed the possibility of obtaining an acceptable non-uniform distribution of the neutron flux over the volume of the ingot.

Keywords: silicon doping; WWR-K reactor; neutron flux density; irregularity of neutron flux.

Введение

В Институте ядерной физики (Казахстан) ведутся работы по развитию метода нейтронно-трансмутационного легирования слитков кремния на реакторе ВВР-К. В период 2011-2015 гг. в рамках сотрудничества между ИЯФ и Агентством по атомной энергии Японии (JAEA) были проведены облучения двух слитков кремния в вертикальном облучательном канале реактора диаметром 200 мм. В результате были получены слитки кремния с неоднородностью легирования 5.6% и 12% [1].

В облучательной позиции реактора ВВР-К, которую планируется использовать для легирования крупногабаритного кремния, неравномерность потока нейтронов по высоте достигает 35% [2]. Из чего следует необходимость разработки специального облучательного устройства, формирующего равномерное нейтронное поле, что позволит получать слитки кремния с высокой однородностью конечного удельного сопротивления.

Одним из методов снижения высотной неравномерности потока нейтронов может

быть использование экранирующих материалов [3]. А для снижения радиальной неравномерности применяется вращение слитка вокруг центральной оси [4]. Такие способы снижения неоднородности поля нейтронов были выбраны в нашем случае. Для прогнозирования ожидаемых нейтронно-физических условий в зоне облучения были проведены расчетные исследования, а затем на критическом стенде была проведена серия экспериментов по изучению эффективности разработанного подхода в способе выравнивания поля нейтронов в облучательной позиции для крупногабаритного кремния.

Материалы, оборудование и методы исследования

Экспериментальные работы на критическом стенде являются важными для правильной разработки метода равномерного облучения и дальнейшей его апробации. Для этого в активной зоне критического стенда была сформирована компоновка, моделирующая условия облучения схожие к условиям облучательной позиции реактора ВВР-К, в части распределения нейтронного поля (Рисунок 1). Подробная информация о критическом стенде приведена в [5]. Основным компонентом разработанного облучательного устройства является профилирующий экран, который был изготовлен из высокомолекулярного борированного полиэтилена марки ПБ-3 с 3 % содержанием бора по массе. В качестве макета слитка кремния использовался слиток из алюминиевого сплава Амг-6, который обладает похожими ядерно-физическими свойствами. В экспериментах использовался слиток из алюминиевого сплава диаметром 295 мм и высотой 280 мм.

В качестве метода экспериментального исследования нейтронного поля был выбран нейтронно-активационный метод как наиболее полно удовлетворяющий специфике реакторных измерений [6]. Применялись аттестованные активационные детекторы из золота (Au^{197}), на которых

протекает ядерная реакция $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$. Энергетическая зависимость плотности потока нейтронов получена с применением экранов из кадмия. Толщина кадмиевого экрана составляла 0.5 мм. Измерение радиоактивности активационных детекторов проводилось с помощью коаксиального широкодиапазонного германиевого полупроводникового детектора Canberra GX 2518 (от 3 кэВ до 3 МэВ), обладающего высоким разрешением. Относительная эффективность детектора составляет 25%. Активность детектора из золота определялась по фотопику 411.8 кэВ.

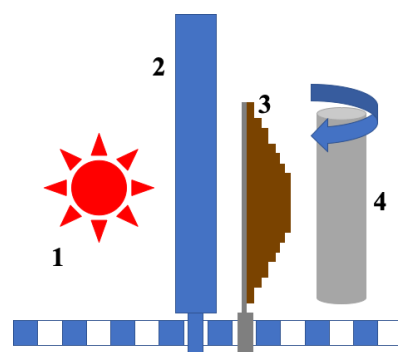


Рис. 1. Схема эксперимента с вращением слитка алюминия: 1 – активная зона; 2 – блок бериллия; 3 – экран (профилирующее устройство); 4 – слиток алюминия

Расчетное сопровождение работ проводилось путём моделирования с помощью программных комплексов MCU-REA [7] и MCNP6 [8] реализующих метод Монте-Карло на основе оцененных ядерных данных для систем с трехмерной геометрией. Программа MCU-REA использует константное обеспечение банка ядерно-физических данных DLC/MCUDAT -2.1, а в MCNP6 используется библиотека сечений ENDF-VIII [9-10].

Результаты и заключение

По результатам экспериментального моделирования была получена следующая высотная неравномерность плотности потока нейтронов:
в ближней аксиальной плоскости – 11%;
в центральной аксиальной плоскости – 6%.

Во время проведения экспериментов слиток из алюминия вращался вокруг центральной оси со скоростью 9 об/мин. Это позволило получить радиальную неравномерность поля нейтронов в пределах 5%.

Расчетные значения неравномерности плотности потока нейтронов составили:

в ближней аксиальной плоскости – 10%;

в центральной аксиальной плоскости – 7%.

Результаты расчетов хорошо коррелируют с экспериментальными данными, что говорит о правильности выбранной модели. Разработанное облучательное устройство рекомендуется для применения в реакторе ВВР-К при облучении крупногабаритных слитков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства энергетики Республики Казахстан в рамках программно-целевого финансирования научных и научно-технических программ
№BR09158958.

Библиографические ссылки

1. Романова Н.К., Гизатулин Ш.Х., Мартюшов А.Л., Накипов Д.А., Чаков П.В., Takemoto N., Kimura N., Saito T., Tsuchiya K. В кн.: Анищик В.М., редактор. Материалы 11-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом». (23-25 сентября 2015 года), г. Минск. Минск: Издательский центр БГУ; 2015: 147-148.
2. Romanova N.K., Gizatulin Sh.Kh., Sairanbayev D.S., Kisselyov K.S., Akhanov A.M., Shaimerdenov A.A. Computational study of radiation characteristics in the niche of the experimental devices of the WWR-K reactor. *NNC RK Bulletin* 2022; (3): 88-93. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-3-88-93>
3. Komeda Masao, Kawasaki Kozo, Obara Toru. A new irradiation method with a neutron filter for silicon neutron transmutation doping at the Japan research reactor no.3 (JRR-3). *Applied Radiation and Isotopes* 2013; (74): 70-77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.01.005>
4. Varlachev V.A., Emets E.G., & Butko Y.A. Technology for Silicon NTD Using Pool-Type Research Reactors. *Advanced Materials Research* 2015; (1084): 333-337. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1084.333>
5. Shaimerdenov A.A., Nakipov D.A., Arinkin F.M., Gizatulin Sh.Kh., Chakrov P.V., and Kenzhin Ye.A. The 50th Anniversary of the WWR-K Research Reactor. *Physics of Atomic Nuclei* 2018; 81(10): 1408-1411. <https://doi.org/10.1134/S1063778818100162>
6. Aitkulov M. T., Dyussambayev D. S., Romanova N. K., Gizatulin Sh. H., Shaimerdenov A. A., Bugbay Zh. T., Kisselyov K. S. and Beisebayev A. O. Measurement of the spatial-energy distribution of neutrons in the irradiation channel of the critical facility. *Journal of Physics: Conference Series* 2022; (2155): 12-21. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2155/1/012021>
7. Гуревич М.И., Шкаровский Д.А. Расчет переноса нейтронов методом Монте-Карло по программе MCU: Учебное пособие. Москва: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; 2012. 154 с.
8. Pelowitz, D.B., (Ed). 2013. MCNP6 TM user's manual, Version 1.0. Los Alamos National Laboratory report LA-CP13-00634.
9. Абагян Л.П., Алексеев Н.И., Брызгалов В. И., Гомин Е.А., Калугин М.А., Майоров Л.В. и др. Программа MCU-REA с библиотекой констант DLC/MCUDAT-2.1. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов: научно-технический сборник 2001; (3): 55-62
10. Brown D. A., Chadwick M. B., Capote R., Kahler A. C., Trkov A., Herman M.W. and et. al. ENDF/B-VIII.0: The 8th Major Release of the Nuclear Reaction Data Library with CIELO-project Cross Sections. New Standards and Thermal Scattering Data. *Nuclear Data Sheets* 2018; (148): 1-142.