

ЛЕГИРОВАНИЕ КРЕМНИЯ МАЛОГО ДИАМЕТРА В ВЕРТИКАЛЬНОМ КАНАЛЕ 230 ММ РЕАКТОРА ИРТ-Т

Н.В. Смольников, И.И. Лебедев, М.Н. Аникин, А.Г. Наймушин, В.А. Варлачев
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
пр. Ленина 30, 634034 Томск, Россия,
nvs38@tpu.ru, iil@tpu.ru, amn@tpu.ru, agn@tpu.ru, varlachev@tpu.ru

В работе рассматривается проблема одновременного легирования слитков кремния малого диаметра в большом экспериментальном канале реактора ИРТ-Т. Показана принципиальная возможность создания контейнера для легирования слитков кремния. Для достижения необходимых параметров радиального и аксиального коэффициента неравномерности распределения легирующей примеси проведен нейтронно-физический расчет с целью определения оптимального материального состава фильтра тепловых нейтронов. Кроме того, в работе были показаны способы размещения фильтра тепловых нейтронов в объеме контейнера.

Показаны методы выравнивания профиля распределения легирующей примеси по объему слитка. Расчеты показали, что использование фильтров в квазистационарном поле облучения позволяют достичь разброса содержания легирующих примесей по высоте слитка менее 5%.

Произведен теплофизический расчет процесса облучения слитков кремния малого диаметра и доказана безопасность эксплуатации установки.

Ключевые слова: кремний; нейтронно-трансмутационное легирование; ядерный реактор; ядерное легирование, фильтр нейтронов.

SMALL DIAMETER SILICON DOPING IN VERTICAL CHANNEL 230 MM OF IRT-T REACTOR

N.V. Smolnikov, I.I. Lebedev, M.N. Anikin, A.G. Naymushin, V.A. Varlachev
Tomsk polytechnic university, 30 Lenina Ave., 634034 Tomsk, Russia
nvs38@tpu.ru, iil@tpu.ru, amn@tpu.ru, agn@tpu.ru, varlachev@tpu.ru

The paper deals with the problem of simultaneous doping of small-diameter silicon ingots in a large experimental channel. The principal possibility of creating a container for the doping of silicon ingots is shown. To achieve the required parameters of the radial and axial coefficient of uneven distribution of the doping impurity, a neutron-physical calculation was performed to determine the optimal material composition of the thermal neutron filter. It is shown that for as a filler material it is possible to use reactor graphite or aviation aluminum alloys.

In addition, the work showed methods for placing a thermal neutron filter in the container volume. The methods of leveling the distribution profile of the dopant by ingot volume are shown. Calculations have shown that the use of filters in a quasistationary irradiation field makes it possible to achieve a variation in the content of dopants in an ingot height less than 5%. The work also shows two methods of rotating the samples to align the radial non-uniformity.

The thermophysical calculation of the process of irradiation of silicon ingots of small diameter was made and the safety of the installation was proved. The maximum temperature of the wall water is no more than 53 °C. The total energy release of the installation is about 60 kW.

Keywords: silicon; neutron transmutation doping; nuclear reactor; neutron filter.

Введение

Бассейновый исследовательский ядерный реактор ИРТ-Т является единственным действующим вузовским реактором в России и используется, в основном, для обучения студентов, наработке изотопов и нейтронно-активационного анализа.

С 1987 года на реакторе ИРТ-Т была смонтирована и введена в эксплуатацию установка для легирования монокристаллического кремния, размещенная на одном из касательных горизонтальных каналов (ГЭК-4). Установка имеет производительность до 5 тонн в год при использовании в качестве сырья заготовок диаметром 128 мм и длиной 700 мм [1].

Требования современной полупроводниковой промышленности к легированию слитков все большего диаметра привели к необходимости организации установки для обучения слитков диаметром более 200 мм, которая с 2015 года проектируется для установки в пустующем околореакторном пространстве.

При эксплуатации ядерного реактора важнейшим экономическим параметром установки является степень загрузки всех экспериментальных каналов. Для повышения процента использования нового канала для облучения кремния планируется облучение слитков меньшего диаметра.

Для этих целей необходимо определить возможность подобных работ и необходимые технические решения для организации облучения.

Основная часть

Возможность установить в контейнер нескольких образцов давно апробирована и используется в 150-миллиметровом горизонтальном канале реактора ИРТ-Т. Однако существует несколько факторов, препятствующих использованию опыта этих работ в новом канале.

Во-первых, кремний в существующей установке охлаждается воздухом, не оказывающим существенного влияния на параметры нейтронного потока.

Во-вторых, кремний в канале ГЭК-4 в процессе облучения перемещается в продольном направлении, что приводит к выравниванию накопленного флюенса по высоте.

На рисунке 1 схематично показана новая установка и место ее размещения около активной зоны реактора.

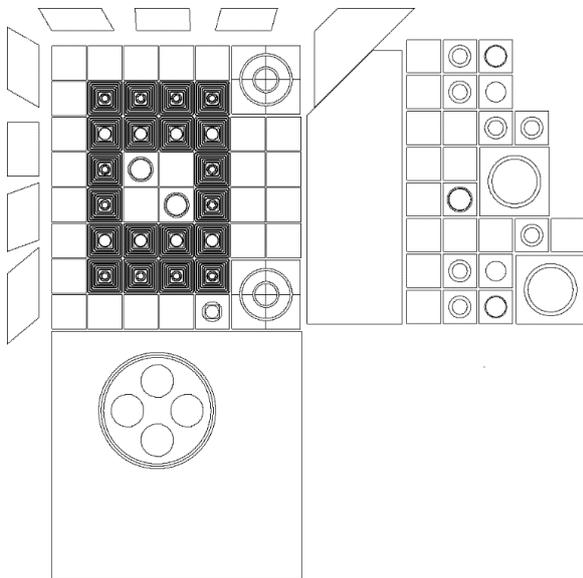


Рис. 1. Схема размещения нового экспериментального канала для легирования кремния

Fig. 1. Position of new experimental channel for silicon doping

На рисунке видно, что в контейнере установлено четыре слитка, с пространством между ними. Это пространство должно быть заполнено каким-либо конструкционным материалом. Поскольку изначально проект канала подразумевал наличие в нем слитка кремния 203 мм, изменение столь большой доли материала ведет к изменению нейтронно-физических характеристик установки.

Материал заполнителя должен обладать двумя свойствами: нейтральностью по отношению к нейтронам и высокой теплопроводностью. С учетом дополнительных требований по механической обработке и активации предлагается использовать один из трех материалов: вода, алюминий (авиационные сплавы – САВ-1, АД) или графит [2].

Проведенные расчеты показали, что наиболее приемлемым с точки зрения достижения максимального нейтронного потока во всех позициях нахождения слитка является графит (рис. 2, 3).

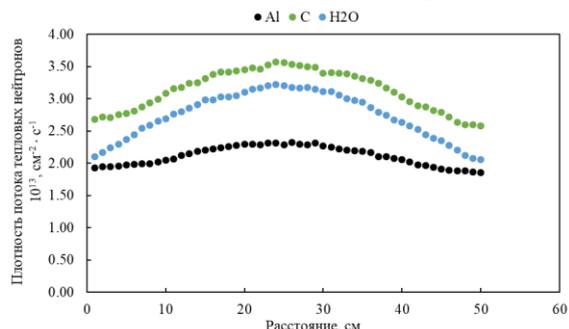


Рис. 2. Аксиальное распределение флюенса нейтронов для ближнего слитка

Fig. 2. Axial distribution of neutron fluence for the near ingot

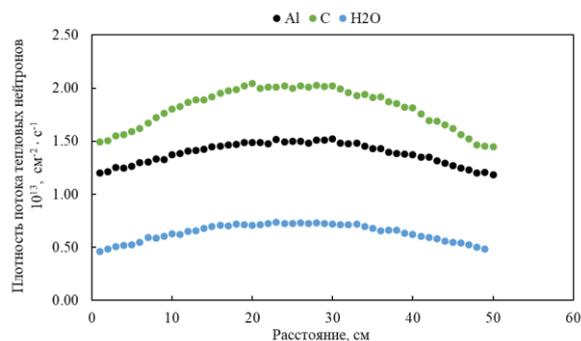


Рис. 3. Аксиальное распределение флюенса нейтронов для дальнего слитка

Fig. 3. Axial distribution of neutron fluence for long-range ingot

Из рисунков видно, что вода существенно ухудшает интегральный поток на слитке, расположенном дальше от активной зоны, что приводит к снижению производительности установки.

Для снижения радиальной неравномерности, возможно применение двух способов вращения образцов – в одном контейнере или индивидуальное. Второй способ лучше с точки зрения радиальной неравномерности, однако существенно сложнее технически (требует четырех приводов либо сложной трансмиссии) и приводит к достижению разных флюенсов в разных позициях слитка.

Первый способ позволит достичь одинакового флюенса на всех слитках, однако из-за того, что в ближней позиции и в дальней разная величина потока, распределение по радиусу будет неоднородным (рис. 4).

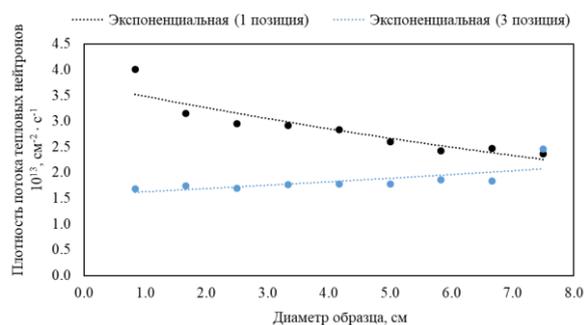


Рис. 4. Радиальное распределение флюенса нейтронов для ближнего (1) и дальнего (3) слитка

Fig. 4. Radial distribution of neutron fluence for the near (1) and long-range (3) ingot

Для равномерного облучения слитков малых диаметров предлагается использование дополнительных фильтров тепловых нейтронов для выравнивания аксиальной неоднородности. Предлагается два основных варианта размещения фильтра (рис. 5).

Параллелепипед из воды хорош своей низкой стоимостью и высокой технологичностью, однако максимально низким значением K_z , которого можно

добиться с помощью подобного фильтра является значение 1.09. Вариант с гафниевым щитом, при довольно высокой трудности его изготовления позволяет достичь $K_2 = 1.05$.

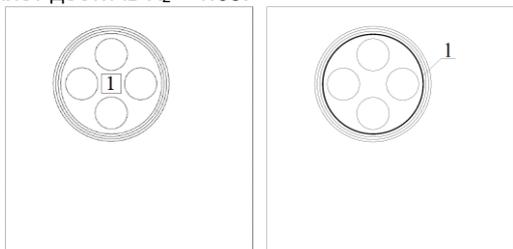


Рис. 5. Варианты размещения выравнивающих фильтров: параллелепипед из воды (левый) и гафниевый щит (правый)

Fig. 5. Axial thermal neutron filter placement options: parallel-leveled of water (left) and hafnium shield (right)

Расчеты энерговыделения в компонентах установки [3] приведены в таблице 1.

Таблица 1. Энерговыделение установки

Table 1. Energy release in facility components

Компонент	Энерговыделение, кВт
Графитовый блок	52.2
Оболочка	2.6
Фильтр	4.1
Ближний слиток	2.7
Левый слиток	1.4
Правый слиток	1.4
Дальний слиток	0.8

При обеспечении естественной циркуляции теплоносителя, максимальная температура пристеночной воды не превысит 53 °C [4].

Заключение

В результате выполнения работ была разработана принципиальная конструкция контейнера с фильтром для облучения слитков кремния малого диаметра в новом экспериментальном канале реактора ИРТ-Т.

С помощью разработанного фильтра тепловых нейтронов можно добиться коэффициента неравномерности внесения легирующих компонентов по высоте слитка не более 1.05, при этом показано, что в качестве материала-заполнителя возможно применять реакторный графит и различные авиа-

Библиографические ссылки

1. Varlachev V.A., Kuzin A.N., Lykhin S.V., Solodovnikov E.S., Usov Y.P., Fotin A.V. Production of Silicon Neutron Transmutation Doping in a Research Reactor (Tomsk Complex) Tsibul'nikov Y.A. *Атомная энергия* 1995; 79 (1): 38-40.

2. Смольников Н.В., Лебедев И.И., Аникин М.Н. Исследование влияния высокотеплопроводящих сплавов на равномерность распределения легирующей примеси при нейтронно-трансмутационном легировании кремния в вертикальном экспериментальном канале реактора ИРТ-Т. *Изотопы: технологии, материалы и применение* : материалы V Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 19-23 ноября 2018 г. Томск : Графика, 2018; 97.

3. Смольников Н.В., Лебедев И.И. Расчет энерговыделения в слитках кремния на реакторе ИРТ-Т В сборнике: Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий научная сессия НИЯУ МИФИ, материалы конференции. под редакцией М.Д. Носкова. 2018; 139.

4. Смольников Н.В., Лебедев И.И., Аникин М.Н., Наймушин А.Г. Моделирование процесса облучения и охлаждения кремния при проведении нейтронно-трансмутационного легирования на реакторе ИРТ-Т. В сборнике: Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине Сборник научных трудов V Международной научной конференции. В 2-х частях. Под редакцией О.Г. Берестневой, А.А. Мицеля, В.В. Спицына, Т.А. Гладковой. 2018; 139-143.

References

1. Varlachev V.A., Kuzin A.N., Lykhin S.V., Solodovnikov E.S., Usov Y.P., Fotin A.V. Production of Silicon Neutron Transmutation Doping in a Research Reactor (Tomsk Complex) *Atomnaya energiya* 1995; 79 (1): 38-40.

2. Smol'nikov N.V., Lebedev I.I., Anikin M.N. Issledovanie vliyaniya vysokoteploprovodyashchikh sployev na ravnomernost' raspredeleniya legiruyushchey primesi pri neytronno-transmutatsionnom legirovaniy kremniya v vertikal'nom eksperimetal'nom kanale reaktora IRT-T [Study of influence high thermal conductivity materials at doping impurity distribution at neutron transmutation doping of silicon in vertical channel of IRT-T research reactor]. *Izotopy: tekhnologii, materialy i primeneniye: materialy V Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov, g. Tomsk, 19-23 noyabrya 2018 g. Tomsk: Grafika, 2018; 97. (In Russian).*

3. Smol'nikov N.V., Lebedev I.I. Raschet energovydeleniya v slitkakh kremniya na reaktore IRT-T [Heating calculation in silicon ingots at IRT-T research reactor]. V sbornike: Aktual'nye problemy innovatsionnogo razvitiya yadernykh tekhnologiy nauchnaya sessiya NIYaU MIFI, materialy konferentsii. pod redaktsiye M.D. Noskova. 2018; 139. (In Russian).

4. Smol'nikov N.V., Lebedev I.I., Anikin M.N., Naymushin A.G. Modelirovaniye protsessa oblucheniya i okhlazhdeniya kremniya pri provedenii neytronno-transmutatsionnogo legirovaniya na reaktore IRT-T. [Modeling of irradiation and cooling of silicon at neutron transmutation doping at the IRT-T research reactor]. V sbornike: Informatsionnye tekhnologii v nauke, upravlenii, sotsial'noy sfere i meditsine Sbornik nauchnykh trudov V Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. V 2-kh chastyakh. Pod redaktsiye O.G. Berestnevoy, A.A. Mitselya, V.V. Spitsyna, T.A. Gladkovoy. 2018; 139-143. (In Russian).