

ПРОБЛЕМЫ ОБЛУЧЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

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

В настоящей работе приведены результаты расчетных экспериментов по облучению слитков монокристаллического кремния диаметром 203 мм в новом вертикальном экспериментальном канале реактора ИРТ-Т. Результаты показывают, что масштабирование технологии ядерного легирования кремния несет ряд проблем: диаметр слитка и контейнера больше, чем диаметр существующих экспериментальных каналов большинства действующих исследовательских реакторов, диаметр слитка сравним с длиной диффузии нейтронов, при расчетах необходимо учитывать эффекты туннелирования, в силу больших габаритов слитка возникает необходимость создания аксиального фильтра тепловых нейтронов. Кроме этого, была проведена оценка влияния сопутствующего гамма-излучения на температурный режим процесса облучения.

В работе показаны результаты нейтронно-физического расчета процесса облучения кремния, выполненного в программе MCU-PTR и теплофизического расчета, выполненного в программе Solidworks.

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

PROBLEMS OF IRRADIATION OF MONOCRYSTALLINE SILICON OF LARGE DIAMETER

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

This paper presents the results of the study of the possibility of doping monocrystalline silicon in a new experimental channel of the IRT-T reactor.

The report contains a study of the features of the interaction of neutrons with an ingot material with a diameter of 203 mm. The main problems of doping: a large mass of the experimental sample, the diffusion length comparable with the diameter of the ingot, the effects of neutron tunneling, radiation heating of the silicon ingot and its cooling.

The results were obtained using the MCU-PTR and Solidworks calculation codes, based on models created specifically for the IRT-T reactor. The neutronic model is verified by the campaigns of the reactor and the operating experience of the silicon doping facility on the HEC-4 channel. The thermophysical model is verified by the results of the experiment on the heating of materials in the HEC-6 channel.

The work shows the optimal values of the neutron spectrum, the volume of the neutron moderator, the estimated characteristics of the thermal neutron filter, and the calculated values of the energy release and reaction rates in the silicon array. Studies have confirmed the possibility of creating an installation for silicon doping in the pool of the IRT-T reactor.

Keywords: silicon; neutron transmutation doping; nuclear reactor.

Введение

На сегодняшний день в странах бывшего СССР не существует ни одной установки по ядерному легированию монокристаллического кремния большого диаметра. Вместе с тем, на реакторе Томского политехнического университета с 1987 года успешно функционирует уникальная установка по легированию слитков кремния диаметром до 128 мм и длиной до 700 мм [1]. Неоднократные запросы наших партнеров и мировой опыт показывает необходимость создания коммерческих технологий для реакторной и послереакторной обработки кремния диаметром более 200 мм.

Сейчас в мире существует только три установки, освоившие легирование кремния диаметром 8 дюймов на промышленной основе. Это реактор FRM-II (Германия), HANARO (Ю.Корея) и BR2 (Бельгия). Все эти реакторы создали установки во время крупных модернизаций, позволивших существенно перекомпоновать облучательные объемы.

Опыт перехода увеличения диаметра облучаемых образцов, показывает, что каждый последующий шаг поднимает все большее и большее количество проблем, что приводит к необходимости применения оригинальных технических решений.

Кроме того, отсутствие в России специализированных реакторных установок для легирования кремния требует адаптации существующих аппаратов и создания на их базе устройств для облучения слитков.

Основная часть

Основными характеристиками полупроводникового кремния являются удельное электрическое сопротивление и равномерность этих характеристик по объему образца.

Первая характеристика зависит исключительно от набранного образцом флюенса нейтронов и, соответственно, количества ядер фосфора, образованных путем трансмутации из кремния. Этот параметр прямо пропорционален двум величинам: плотности потока тепловых нейтронов и времени облучения.

Равномерность внедрения примесей зависит от однородности нейтронного поля в каждой точке слитка. Условно можно выделить две компоненты: радиальную и аксиальную.

На существующей установке, смонтированной на горизонтальном канале, устранение аксиальной

неоднородности происходит за счет продольного движения слитков (рис. 1).

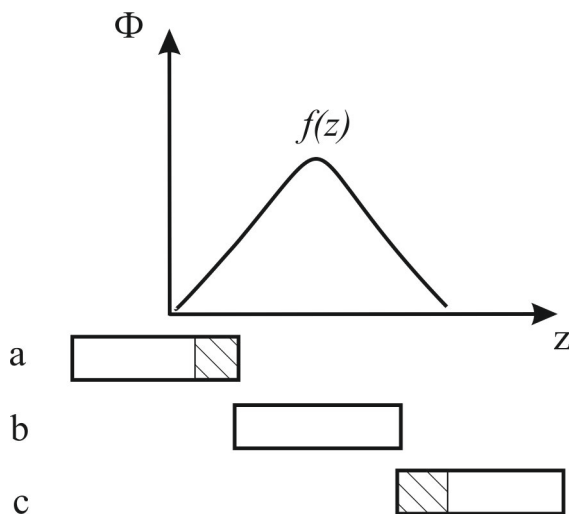


Рис. 1. Схема перемещения контейнера в процессе НТЛ на реакторе ИРТ-Т

Fig. 1. The pattern of movement of the container in the NTD process at the IRT-T reactor

По этой схеме возвратно-поступательного движения контейнер перемещают из положения а в с и обратно. Зона сканирования была выбрана так, что в крайних позициях торцы слитков (положения а и с) набирают лишний флюенс, данные зоны заштрихованы. Для устранения этого эффекта вводится временная поправка, учитываемая для каждой загрузки [2].

Поскольку большинство горизонтальных каналов существующих в России исследовательских реакторов жестко установлены в массиве биологической защиты и имеют диаметр до 150 мм, подобная технология может быть использована на реакторах с пустующим касательным каналом и диаметром кремния до 5 дюймов.

Для слитков большого диаметра (> 150 мм) наиболее экономичным способом является создание вертикального канала в околореакторном пространстве бака с установкой дополнительного объема замедлителя и самого облучательного устройства.

При этом не все реакторы конструктивно предполагают возможность перемещения экспериментального образца ниже торца активной зоны, следовательно, метод продольного перемещения не применим. В таком случае используют фильтры тепловых нейтронов, представляющие собой экраны из поглощающих материалов – борсодержащий, никелевых, стальных фильтров.

На рисунке 2 условно показан профиль фильтра для достижения однородного нейтронного поля в канале для облучения кремния. Этот метод заметно снижает интегральную плотность потока нейтронов, но существенно повышает качество получаемого образца.

Радиальная однородность обеспечивается непрерывным вращением слитков в установке и размещением образцов в области с низким градиентом плотности потока нейтронов. Наиболее выгодным является область, в которой функция градиен-

та потока тепловых нейтронов будет являться нечетной, в этом случае вращение слитка позволит добиться практически полной компенсации радиальной неравномерности.

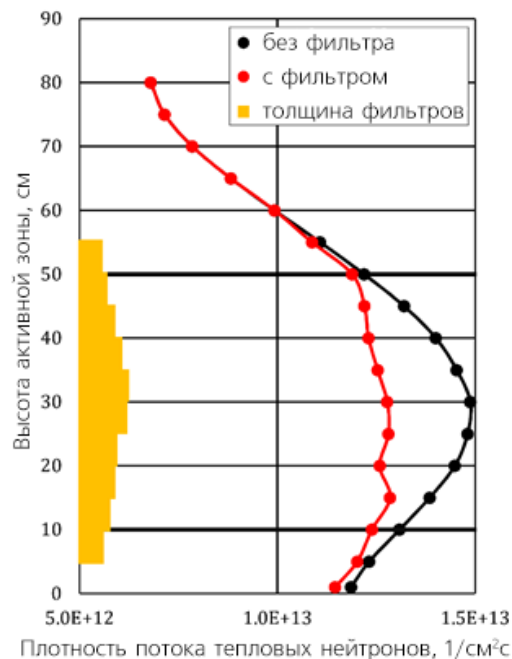


Рис. 2. Конструкция фильтра и плотности потока до и после установки фильтра

Fig. 2. Design of filter and neutron fluxes before and after filter installation

Существенной проблемой при моделировании процесса облучения являлся эффект, обнаруженный в монокристаллическом кремнии – за счет упорядоченной структуры, сечение поглощения в тепловой области у монокристаллического кремния существенно ниже, чем для аморфного. При этом существующие библиотеки констант созданы для модели «свободного газа» [3] (рис. 3).

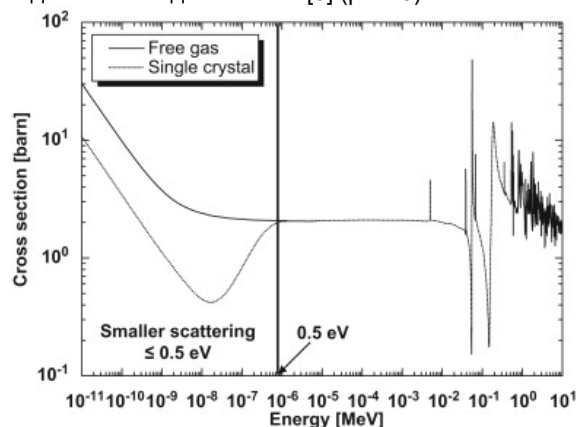


Рис. 3. Зависимости микроскопического сечения полного взаимодействия нейтронов с ядрами кремния [3]

Fig. 3. Dependences of total neutron cross section in silicon [3]

Для повышения точности расчета скоростей реакции в модели уменьшались ядерные концентрации кремния, при этом итеративно определялась

спектральная характеристика потока нейтронов в канале. Уменьшение ядерных концентраций в различных расчетах составило от 2 до 5 раз.

Точность и достоверность модели взаимодействия нейтронов с ядрами кремния была доказана путем сравнения результатов расчета с результатами экспериментов на горизонтальном канале ГЭК-4.

Одним из основных ограничений при создании новых облучательных устройств является энерговыделение в конструкциях канала и в самих образцах. Поскольку для кремния температурные режимы реакторной обработки особенно критичны (при повышенных температурах происходит «закалка» радиационных дефектов) и конструкция самого реактора запрещает поверхностное кипение теплоносителя первого контура, необходимо было определить величину энерговыделения в слитке кремния и замедлителе и соотнести ее с возможностями охлаждения водой бассейна реактора [4].

Результаты расчета показали, что энерговыделение в слитке кремния длиной 500 мм и диаметром 203 мм и работе на мощности 6 МВт, составит ~3.5 кВт, что при зазоре в 3 мм и температуре воды в баке – 45 °С дает температуру поверхности слитка, не превышающую 65 °С и температуру в середине слитка не более 89 °С при обеспечении естественной циркуляции теплоносителя.

Заключение

Результаты исследований доказали принципиальную возможность организации нового вертикального канала для облучения слитков монокристаллического кремния. Определены условия его создания (обеспечение вращения, создание аксиального фильтра тепловых нейтронов, условия охлаждения слитка кремния).

Создана нейтронно-физическая и теплогидравлическая модели, верифицированные экспериментами, позволяющие проводить полномасштабное трехмерное моделирование процессов облучения в экспериментальном канале.

Библиографические ссылки

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

2. Варлачев В.А., Зенков А.Г., Солодовников Е.С. Особенности нейтронно-трансмутационного легирования кремния на исследовательских реакторах. *Известия высших учебных заведений. Физика* 1998; (4): 210.
3. Дмитриев С.К., Лебедев И.И. Формирование поля нейтронного излучения для легирования слитков кремния большого диаметра. В сборнике: Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий; научная сессия НИЯУ МИФИ, материалы конференции; под редакцией М.Д. Носкова. 2018. С. 123.
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 научных трудов V Международной научной конференции "Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине". В 2-х частях. Под редакцией О.Г. Берестневой, А.А. Мицеля, В.В. Спицына, Т.А. Гладковой. 2018. С. 139-143.

References

1. Varlachev V.A., Kuzin A.N., Lykhin S.V., Solodovnikov E.S., Usov Y.P., Fotin A.V., et al. Production of Silicon Neutron Transmutation Doping in a Research Reactor (Tomsk Complex). *Atomnaya energiya* 1995; 79 (1): 38-40.
2. Varlachev V.A., Zenkov A.G., Solodovnikov E.S. Osobennosti Neytronno-Transmutatsionnogo Legirovaniya Kremniya na Issledovatel'skikh Reaktorakh [Features of neutron transmutation doping of silicon at research reactors] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Fizika* 1998; (4): 210. (in Russian).
3. Dmitriev S.K., Lebedev I.I. Formirovaniye Polyay Neytronnogo Izlucheniya dlya Legirovaniya Slitkov Kremniya Bol'shogo Diametra [Development of neutron radiation field for neutron transmutation doping of silicon of large diameter] V sbornike: Aktual'nye problemy innovatsionno-go razvitiya yadernykh tekhnologiy nauchnaya sessiya NIYaU MIFI, materialy konferentsii. pod redak-tsiey M.D. Noskova. 2018. S. 123. (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 redaktsiey O.G. Berestnevoy, A.A. Mitselya, V.V. Spitsyna, T.A. Gladkovoy. 2018. S. 139-143. (in Russian).