

СОЗДАНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЛЕГИРОВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

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

Работа посвящена освещению результатов проектирования установки для легирования монокристаллического кремния диаметром 203 мм и длиной 500 мм, планируемую к установке на пустующем месте бассейна реактора ИРТ-Т. Показаны результаты моделирования блока замедлителя, фильтра тепловых нейтронов, оптимизации активной зоны и процесса облучения слитка. Приведены расчётные данные по достигаемым параметрам установки: качеству легирования, производительности, величине наведенной активности образца и влиянию на безопасность эксплуатации реактора ИРТ-Т.

В докладе представлены температурные и нейтронно-физические параметры облучения монокристаллического кремния, обоснована конструкция облучательного устройства и показаны способы изменения регламент эксплуатации реактора ИРТ-Т для повышения производительности установки.

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

FACILITY CREATION FOR LARGE-DIAMETER MONOCRYSTAL SILICON DOPING

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

The paper presents the results of a study of the possibility of creating a facility for the doping of large-diameter monocrystal silicon at the pool-type research reactor IRT-T.

It is proved in the work that in the empty place of the reactor basin it is possible to create a new installation. Characteristics of the irradiated silicon: diameter - 203 mm, length - 500 mm.

The paper presents the result of neutron calculation of three block options: graphite, beryllium and heavy water. The design of the reflector unit and thermal neutron filter is reasonable. It is shown that the use of graphite is economically justified.

The article proves nuclear and radiation safety when using the installation. The total value of positive reactivity from the installation of a graphite block is not more than 0.65 β_{eff} . The value of the introduced positive reactivity is not more than 0.07 β_{eff} . It is shown that the materials of the ingot and the container are practically not activated by neutrons, and surface contamination can be washed away with chemical solutions.

In this paper, two ways to improve plant performance were considered: re-compensation of control and protection rods and change in the core fuel layout. The use of two methods at the same time will increase the plant capacity by 17-25%.

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

Введение

На реакторе ИРТ-Т Национального исследовательского Томского политехнического университета проводятся исследования в области облучения слитков монокристаллических полупроводникового с 1987 года. Один из касательных каналов (ГЭК-4) с 1989 года используется для облучения слитков кремния диаметром до 5 дюймов (~127 мм) и длиной до 750 мм. Плотность потока тепловых нейтронов в этом канале достигает $1.95 \cdot 10^{13}$ н/см²с. В настоящем докладе представлены результаты НИОКР по созданию дополнительного облучательного канала, для нейтронно-трансмутационного легирования кремния диаметром до 8 дюймов.

Бассейновый реактор ИРТ-Т, был введен в эксплуатацию в 1967 году. После масштабной модернизации 1984 года, его мощность была увеличена до 6 МВт. Активная зона реактора представляет собой прямоугольную призму, набранную из 20 тепловыделяющих сборок типа ИРТ-3М (12 восьмитрубных и 8 шеститрубных), окруженных блоками бериллиевого отражателя. Справа от зоны установлена внутренняя тепловая сборка из блоков бериллия. В качестве замедлителя, теплоносителя

и верхней биологической защиты используется обессоленная вода. Боковая биологическая защита представляет собой бак из слоя стали, алюминия и тяжелого бетона [1].

В настоящее время исследователи получают запросы от производителей силовой электроники и полупроводникового сырья на легированные пластины монокристаллического кремния большого (>200 мм) диаметра. Согласно отчету МАГАТЭ, некоторые мировые установки (OPAL, FRM-II, BR2) освоили технологии облучения и послереакторной обработки подобных слитков. На других, в том числе, ИРТ-Т, ведутся работы по модернизации существующих экспериментальных устройств.

Конструкция установки

После масштабной модернизации реактора ИРТ-Т, проведенной в 2014-2015 годах, и продления эксплуатационного ресурса установки до 2035 года, были проведены маркетинговые исследования рынка полупроводниковых материалов и поставлена задача освоить технологию легирования слитков кремния диаметром до 203 мм и длиной 500 мм. Поскольку существующие каналы имеют

максимальный диаметр 150 мм, было принято решение о создании нового устройства – вертикального экспериментального канала в пустующем пространстве бака реактора, на месте существовавшего ранее генератора активности [1].

Рассматривалось три варианта материала (рис. 1) замедлителя для формирования спектра нейтронного потока, оптимального для легирования кремния: металлический бериллий, тяжелая вода и графит. С точки зрения технологичности (стоимости, легкости в обработке и обслуживании) установка наиболее приемлемым вариантом было использование графита.

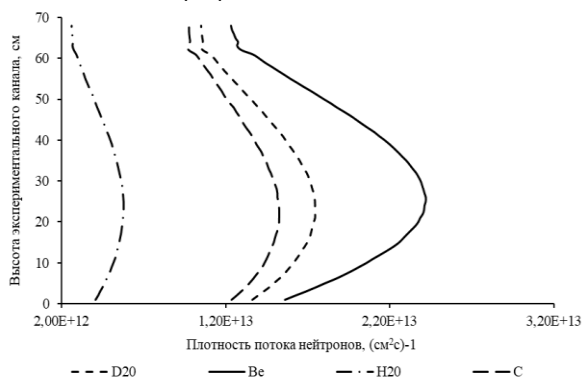


Рис. 1. Сравнение различных замедлителей нейтронов для установки легирования кремния

Fig. 1. Comparison of various neutron moderators for silicon doping facility

При этом необходимо принять во внимание тот факт, что избыток тепловых нейтронов в центральной части все равно требует выравнивания, поэтому преимущества бериллия или тяжелой воды практически нивелируются в реальной установке.

Размер графитового блока в поперечном сечении 50x50 см, высота равна высоте активной зоны – 60 см.

Величина вносимой дополнительной реактивности 0.65 β_{eff} , величина возмущений от введения слитка кремния в полость блока не более 0.07 β_{eff} . На основании этих значений можно утверждать, что установка не несет опасности с точки зрения ядерной безопасности.

В отличие от существующей установки, функционирующей на канале ГЭК-4 [2], продольное движение в вертикальном канале организовать невозможно, поэтому необходимо разработать фильтр для выравнивания нейтронного поля в аксиальном направлении. В расчетах, проводимых совместно со специалистами АО «НИКИЭТ», было принято решение использовать фильтр из металлического гафния, установленного таким образом, чтобы затенять часть слитка кремния в области повышенного потока тепловых нейтронов. В настоящий момент, разработано три варианта конструкции фильтрующих элементов, возможных для установки в новом блоке: в виде пластины с изменяющейся толщиной, в виде решетки для частичного затенения центра слитка и в виде полос переменной ширины. Окончательный выбор варианта фильтра будет осуществлен после монтажа основ-

ной части блока и проведения подтверждающих измерений.

Оптимизация активной зоны

В работе были рассмотрены два способа повышения производительности установки: перекомпенсация стержней управления [2] и защиты и изменение топливной загрузки активной зоны. Применение двух методов одновременно позволит увеличить производительность установки на 17-25 %.

Существует два варианта компоновки активной зоны с точки зрения размещения «свежих» ТВС: в первом случае, «свежие» сборки размещаются со стороны экспериментального канала, тем самым повышая интегральную плотность потока нейтронов, во втором случае, со стороны облучательной установки размещаются сборки с большей глубиной выгорания, снижающие поток в целом, но приводящие к выравниванию профиля потока, падающего на поверхность графитовой призмы [3-4].

Радиационная безопасность

В процессе облучения материалы экспериментального образца и облучательной установки накапливают так называемую наведенную активность – образование радиоактивных веществ, обусловленное взаимодействием ядер вещества с нейтронами.

Согласно концепции установки веществами, контактирующими с окружающей средой, являются алюминий (в виде специального реакторного сплава САВ-1 либо сплавов марки АД1) и кремний.

Природный алюминий состоит из одного изотопа Al-27, который имеет крайне малое (менее 1 барна) сечение поглощения нейтронов во всем диапазоне энергетического спектра реакторного излучения.

При захвате Al-27 образуется короткоживущий β -активный изотоп Al-28 с периодом полураспада 134.48 секунды, который в результате эмиссии электрона превращается в Si-28, являющийся стабильным изотопом.

Наибольший вклад в величину радиоактивности вносят примеси, входящие в состав алюминиевого сплава: кремний 0.3 %, железо 0.3 %, медь 0.05 %, марганец 0.025 %, магний 0.05 %, цинк 0.1 %, титан 0.15 %.

Сечения (n, γ)-реакции на тепловых нейтронах, периоды полураспада наиболее активных примесей титана, марганца и меди, а также энергия испускаемых ими бета-частиц представлены в таблице 1.

Таблица 1. Информация об основных примесях алюминиевых сплавов [4]

Table 1. Information on the main impurities of aluminum alloys

Изотоп	Сечение (n, γ)-реакции	Период полураспада	Энергия β -частица
^{50}Ti	$\sigma_{T,H} = 0.18 \text{ б}$	$T_{1/2} = 5.8 \text{ мин}$	2.47 МэВ
^{55}Mn	$\sigma_{T,H} = 13.3 \text{ б}$	$T_{1/2} = 2.6 \text{ ч}$	3.69 МэВ
^{65}Cu	$\sigma_{T,H} = 3.85$	$T_{1/2} = 5.1 \text{ мин}$	2.64 МэВ

Радиоактивность, вызванная облучением самого слитка кремния, складывается из образования радиоактивных изотопов кремния-31, и радиоактивного изотопа фосфора-32. Оба изотопа являются короткоживущими и распадаются в течение срока выдержки в хранилище (5-7 дней) до безопасного уровня.

Помимо остаточной радиоактивности от изотопа фосфора-32, на поверхности кремния можно обнаружить загрязнения долгоживущими радиоактивными изотопами. При облучении в реакторах бассейнового типа загрязнения такого рода в отдельных случаях значительно превышает допустимые значения. Это происходит из-за загрязнения теплоносителя продуктами радиоактивного распада.

От поверхностных радиоактивных загрязнений можно избавиться, применив метод химического травления, который обычно используется для удаления небольших количеств материала.

Заключение

В результате выполнения работ была разработана принципиальная конструкция дополнительного канала для облучения кремния диаметром до 203 мм. Показана принципиальная возможность повышения среднего нейтронного потока в экспериментальном канале за счет изменения регламента движения стержней и оптимизации конфигурации активной зоны. Так, в рассматриваемой в расчетах кампании, среднее повышение плотности потока в кремнии составило 20 %.

Показано, что существующая технология является ядерно- и радиационно-безопасной.

Библиографические ссылки

1. Аникин М.Н., Лебедев И.И. Оптимизация нейтронно-физических характеристик бассейнового реактора ИРТ-Т В книге: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тезисы докладов Двадцать второй Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов: в 3 томах. 2016; 5-6.
2. Shchurovskaya M.V., Alferov V.P., Geraskin N.I., Radaev A.I., Naymushin A.G., Chertkov Y.B., et al. Control Rod Calibration Simulation Using Monte Carlo Code for the IRT-TYPE Research Reactor. *Annals of Nuclear Energy* 2016; 96: 332-343.
3. Дмитриев С.К., Лебедев И.И., Аникин М.Н. Определение оптимальной компоновки активной зоны реактора

ИРТ-Т для достижения эффективного облучения слитков кремния большого диаметра. В сборнике научных трудов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Перспективы развития фундаментальных наук". Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2017; 102-104.

4. Дмитриев С.К., Золотых Д.Е., Лебедев И.И. Оптимизация конфигурации активной зоны реактора ИРТ-Т для облучения слитков монокристаллического кремния большого диаметра. В сборнике научных трудов XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Перспективы развития фундаментальных наук"; под редакцией И.А. Курзиной, Г.А. Вороновой. 2018; 117-119.

References

1. Anikin M.N., Lebedev I.I. Optimizatsiya neytronno-fizicheskikh kharakteristik basseynovogo reaktora IRT-T [Optimization of neutron physical characteristics of pool-type IRT-T research reactor]. V knige: Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: tezisy докладov Dvadsat' vtoroy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov: v 3 tomakh. 2016. S. 5-6. (in Russian).
2. Shchurovskaya M.V., Alferov V.P., Geraskin N.I., Radaev A.I., Naymushin A.G., Chertkov Y.B., et al. Control Rod Calibration Simulation Using Monte Carlo Code for the IRT-TYPE Research Reactor. *Annals of Nuclear Energy* 2016; 96: 332-343.
3. Dmitriev S.K., Lebedev I.I., Anikin M.N. Opredelenie optimal'noy komponovki aktivnoy zony reaktora IRT-T dlya dostizheniya effektivnogo ob-lucheniya slitkov kremniya bol'shogo diametra [Feasibility study of increasing effective of reactor core for quality irradiation of silicon of large diameter]. V sbornike nauchnykh trudov XIV Mezhdunarodnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk". Natsional'nyy issledovatel'skiy Tomskiy politekhnicheskii universitet. 2017; 102-104. (in Russian).
4. Dmitriev S.K., Zolotykh D.E., Lebedev I.I. Optimizatsiya konfiguratsii aktivnoy zony reaktora IRT-T dlya ob-lucheniya slitkov monokristallicheskogo kremniya bol'shogo diametra [Optimization of reactor core of IRT-T research reactor for irradiation of monocrystalline silicon of large diameter]. V sbornike nauchnykh trudov XV Mezhdunarodnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk"; pod redaktsiei I.A. Kurzinoi, G.A. Voronovoi. 2018; 117-119. (in Russian).