

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОМПОНОВКИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ИРТ-Т
ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ОБЛУЧЕНИЯ СЛИТКОВ КРЕМНИЯ БОЛЬШОГО
ДИАМЕТРА**

С.К. Дмитриев, И.И. Лебедев, М.Н. Аникин

Научный руководитель: к.ф.-м.н. А.Г. Наймушин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: skd1@tpu.ru

**DETERMINATION OF THE OPTIMAL CONFIGURATION OF THE IRT-T CORE TO ACHIEVE
EFFECTIVE DOPING OF LARGE DIAMETER SILICON INGOTS**

S.K. Dmitriev, I.I. Lebedev, M.N. Anikin

Scientific Supervisor: PhD A.G. Naymushin

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: skd1@tpu.ru

***Abstract.** In this paper, we examined the main trends in world demand for semiconductor materials. Taking into account the considered trends, at the initial stage a model of a new experimental irradiation volume was constructed, which will allow to obtain ingots of a semiconductor material up to 200 mm in size with high doping accuracy. The next step was to determine the regularities of the FA location in the core, in order to obtain the conditions for the maximum effective flow of NTD in the new experimental channel. In addition, an assessment was made of the influence of regulatory authorities on the course of NTD.*

Введение. Исследовательские ядерные реакторы, как инструмент для радиационной обработки материалов, обладают большим потенциалом. Как правило, исследовательские ядерные реакторы характеризуются небольшими размерами активной зоны и большим градиентом величины плотности потока нейтронов. Поэтому для них актуальной является задача определения условий равномерного облучения образцов больших размеров с малой пространственной неоднородностью. Её решение особенно важно для реализации технологий нейтронного трансмутационного легирования слитков кремния. Этот материал является принципиально важным для силовой электроники.

Одним из немногих объектов в РФ, реализующих нейтронное трансмутационное легирование кремния, является исследовательский ядерный реактор ИРТ-Т. На сегодняшний день технология НТЛ на ИРТ-Т освоена на высоком уровне. Процесс облучения слитков кремния организован в экспериментальных каналах, позволяющих облучать образцы размером до 125 мм и достигать объемной неравномерности легирования до 3%. Таким образом, целью настоящей работы является проектирование и создание нового экспериментального канала, который бы позволил применить технологию НТЛ для образцов кремния до 200 мм без потери предъявляемых к ним требований.

1 Нейтронное трансмутационное легирование кремния. Среди всех существующих методов имплантации примесей наиболее высокая однородность электрофизических параметров кремния достигается при использовании технологии нейтронного трансмутационного легирования (НТЛ). Поэтому

кремний, легированный по этой технологии, широко используется в мировой практике для создания приборов с минимальным разбросом удельного электрического сопротивления: тиристоры, приборы с зарядовой связью, детекторы излучений, фотоприемники[1].

Создание технологии НТЛ кремния с заданными свойствами – это сложная комплексная задача. Для её решения необходимо выполнить следующие условия:

– обеспечить высокую однородность флюенса нейтронов в любой точке облучаемого слитка, при этом пространственная однородность флюенса нейтронов должна быть выше, чем однородность распределения доноров, атомов P^{31} в кремнии;

– оптимизировать нейтронно-физические параметры зоны облучения для получения термализованного спектра нейтронов, так как концентрация и свойства радиационных дефектов зависят в большой степени от условий облучения (флюенса нейтронов, температуры облучения, а также в большей мере от соотношения плотности потока тепловых и быстрых нейтронов)[2].

2 Проектирование нового экспериментального канала. Технология НТЛ является самой эффективной для объёмных монокристаллов крупного диаметра из-за большой длины пробега нейтронов в кремнии. В связи с возросшим спросом на слитки кремния большего диаметра, который имеет большое значение в силовой и микроэлектронике, появилась необходимость создания новой установки, увеличения объёмов выпускаемой продукции, а также повышения её качества.

Новый облучательный объём должен обеспечивать низкую жесткость спектра, помимо этого должен позволять облучать слитки кремния больших размеров до 200мм, при этом без ухудшения характеристик получаемого продукта. При анализе активной зоны реактора ИРТ-Т для выбора местоположения нового облучательного объёма, была выявлена свободная область в бассейне реактора около стержня автоматического регулирования, в которой имеется возможность разместить экспериментальный канал без нарушения работы ядерного реактора.

В качестве расчётной модели для программы MCU была выбрана полномасштабная модель ядерного реактора ИРТ-Т с последующей модернизацией[3]. На первом этапе расчёта в качестве нового облучательного объёма была выбрана графитовая призма, которая представлена на рисунке 1, а соприкасающаяся грань экспериментальной призмы была разбита на ряд регистрируемых зон, что наглядно видно на рисунке 2.



Рис. 1 – Построение нового облучательного объёма в активной зоне реактора ИРТ-Т



Рис. 2 – Расположение регистрационных зон на экспериментальном канале

Первоначальная задача, определения оптимальных параметров активной зоны заключалась в определении компоновки, которая бы соответствовала эффективному протеканию НТЛ. Для решения поставленной задачи была выбрана кампания ядерного реактора с компоновкой активной зоны за 2016 год,

которая представлена на рисунке 3. Во время моделирования работы ядерного реактора, были рассмотрены различные варианты компоновки активной зоны. При расчёте аксиального коэффициента неравномерности в настоящей работе рассматривались регистрационные зоны 3-2 – 8-3, поскольку именно в этой области призмы будет находиться экспериментальный канал.

Результаты расчёта показали, что наибольшая эффективность протекания НТЛ достигается в том случае, когда свежее топливо располагается ближе к экспериментальному объёму. Причем, наибольшая плотность потока тепловых нейтронов на рассматриваемой поверхности достигается в случае, когда ТВС с наименьшим выгоранием находятся у экспериментального объёма в центральной части, а если более свежие ТВС расположить по краям – достигается меньшая неравномерность.

Полученные результаты показали, что значение плотности потока тепловых нейтронов через поверхность экспериментального объёма очень сильно зависит от компоновки активной зоны. При этом значение плотности потока тепловых нейтронов в крайних случаях может различаться до 40 %.

Заключение. Во время выполнения работы была построена модель нового экспериментального облучательного объёма, который позволит получать слитки полупроводникового материала размером до 200 мм с высокой точностью легирования. Также, был определен ряд закономерностей расположения ТВС в активной зоне, для получения условий максимально эффективного протекания НТЛ в новом экспериментальном канале. Расчёт показал, что только перестановкой ТВС можно повысить производительность до 40 %, при этом сохраняя однородность легирования при аксиальном коэффициенте неравномерности до 1,27.

Плотность потока тепловых нейтронов			
6,44E+12	8,63E+12	9,36E+12	7,10E+12
1,43E+13	1,98E+13	2,02E+13	1,55E+13
2,47E+13	3,43E+13	3,53E+13	2,75E+13
3,28E+13	4,63E+13	4,80E+13	3,76E+13
3,66E+13	5,36E+13	5,62E+13	4,57E+13
3,70E+13	5,25E+13	5,81E+13	4,83E+13
3,12E+13	4,42E+13	4,83E+13	4,14E+13
2,03E+13	2,86E+13	3,12E+13	2,61E+13

Рис.3– Результаты расчёта первоначальной загрузки активной зоны
 $k_{eff} = 1,0264$; $k_z = 1,2997$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев С.К., Лебедев И.И., Аникин М.Н., Чертков Ю.Б. Моделирование расположения нового облучательного объема для НТЛ кремния в реакторе ИРТ-Т // Сборник тезисов докладов VII Школы-конференции молодых атомщиков сибери. – 2016. – с 113.
2. Бохан П. А. и др. Оптическое и лазерно-химическое разделение изотопов в атомарных парах //М.: Физматлит. – 2010
3. Емец Е. Г. Оптимизация условий облучения и разработка установки для ядерного легирования кремния в реакторе ИРТ-Т: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.09. 02 : дис. – 2015Фамилия И.О. Название статьи // Журнал. – 2012. – Т. 1. – № 11. – С. 71–77.