

На правах рукописи



Емец Евгений Геннадьевич

**ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ОБЛУЧЕНИЯ И РАЗРАБОТКА
УСТАНОВКИ ДЛЯ ЯДЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ КРЕМНИЯ В
РЕАКТОРЕ ИРТ-Т**

05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: **Кривобоков Валерий Павлович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Смирнов Серафим Всеволодович**
доктор технических наук, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, профессор кафедры физической электроники, г. Томск

Павлюк Александр Олегович
кандидат физико-математических наук, Акционерное общество «Опытно-демонстрационный центр вывода из эксплуатации уран-графитовых ядерных реакторов», начальник лаборатории спектрометрии и ядерно-физических исследований, г. Северск

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС», г. Москва

Защита диссертации состоится «02» марта 2016 года в 16 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/2800/worklist>.

Автореферат разослан: «15» января 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.269.10
доктор физико-математических наук,
профессор

Кабышев А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Современный уровень развития микроэлектроники постепенно выдвигает все более высокие требования к качеству и геометрическим размерам полупроводниковых монокристаллов. Лидирующее место по использованию полупроводниковых материалов по-прежнему занимает кремний [1]. Управление свойствами кристаллов путём легирования нужными примесями до заданных концентраций является основным технологическим приемом при создании любых приборов твердотельной электроники.

Мировой рынок силовых полупроводниковых приборов оценивается в 13-15 миллиардов долларов (~5% мирового рынка полупроводников) и показывает стабильный рост. Наиболее быстрорастущий сегмент – IGBT транзисторы, изготавливаемые на эпитаксиальных структурах с толстыми слоями кремния. Рост обусловлен высокой активностью на рынке гибридных автомобилей, электроприводов промышленных двигателей и инверторов для солнечных энергосистем. Для производства данных приборов необходимы пластины кремния больших размеров.

С помощью технологии ядерного легирования (ЯЛ) получают кристаллы высокого качества с минимальным разбросом электрофизических характеристик, что очень важно при производстве сверхбольших интегральных схем, тиристоров, транзисторов средней мощности и других полупроводниковых приборов. Она оказалась самой эффективной для объёмных монокристаллов крупного диаметра из-за большой длины пробега нейтронов в кремнии.

Главной операцией, определяющей основные качественные и экономические показатели процесса ЯЛ, является облучение слитков кремния тепловыми нейтронами [2].

До начала данной работы на реакторе ИРТ-Т Томского политехнического университета несколько лет функционировала установка для легирования образцов диаметром до 4 дюймов и длиной до 500 мм. Её недостатками были низкая производительность и малая эффективность использования нейтронного поля на 50%. В связи с возросшим спросом на слитки кремния большего диаметра, который играет немаловажную роль в силовой и микроэлектронике, появилась необходимость создания новой установки, увеличения объёмов выпускаемой продукции, а также повышения

её качества. Кроме того, в настоящее время в развитии полупроводниковой электроники возникла проблема однородности электрических характеристик кремния. Она связана с разработкой и изготовлением приборов с большой площадью р-п-переходов, в которых наличие локальных флуктуаций электрических характеристик материала могут приводить к электрическому пробую и деградации устройств. В связи с этим актуальным является создание установки ядерного легирования слитков кремния больших размеров для получения высококачественного полупроводникового материала, используемого при производстве силовых полупроводниковых приборов нового поколения.

Идея работы заключается в создании в реакторе бассейнового типа новой высокопроизводительной установки для ядерного легирования кремния.

Цель работы: теоретические и экспериментальные исследования нейтронно-физических характеристик реактора ИРТ-Т и создание на его базе установки ядерного легирования слитков кремния больших размеров.

Задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели:

1. Провести расчетным и экспериментальным путями оптимизацию нейтронно-физических характеристик зоны облучения, с целью увеличения размера легируемых слитков кремния и достижения международных стандартов качества ЯЛ (разброс удельного электрического сопротивления (у.э.с.) по торцу слитка не более 5%, отклонение от номинала легирования не более 7%).
2. Разработать алгоритм облучения, позволяющий обеспечить максимально высокую производительность установки.
3. Разработать и создать систему мониторингирования нейтронного поля для оперативного контроля процесса легирования.
4. Произвести расчёт и создать биологическую защиту установки, которая обеспечит дозовые нагрузки на обслуживающий персонал, не превышающие допустимые.
5. Разработать и внедрить на базе реактора ИРТ-Т промышленную автоматизированную установку ЯЛ слитков кремния, размеры которых (диаметр до 5 дюймов и длина до 700 мм) превышают габариты активной зоны (АЗ).

6. Провести легирование опытной партии слитков монокристаллического кремния.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Разработаны принципы проектирования автоматизированной установки для ЯЛ слитков кремния большого размера.
2. Разработан новый алгоритм облучения, позволяющий в 2 раза повысить производительность технологической схемы по сравнению с существовавшей ранее.

Практическая значимость

Разработана и внедрена в производство на реакторе ИРТ-Т установка для ЯЛ слитков кремния диаметром до 5 дюймов и длиной до 700 мм с пространственной неоднородностью легирования менее 5% и производительностью до 4 тонн в год на конечный номинал удельного сопротивления 60 Ом·см.

Создана система мониторинга нейтронного поля, позволяющая оперативно контролировать процесс легирования.

Выполнена работа по оптимизации зоны облучения на реакторе ИРТ-Т для легирования слитков кремния большого диаметра с высоким качеством.

Создан и запущен в эксплуатацию производственный участок, который позволил выйти на международный рынок нейтронного легирования кремния.

Научные положения выносимые на защиту:

1. Высокопроизводительная автоматизированная установка для ядерного легирования слитков кремния больших размеров. Доказана её работоспособность и высокая надёжность.
2. Алгоритм облучения слитков, реализация которого позволяет удвоить производительность установки.
3. Бериллий является оптимальным материалом для создания зоны облучения слитков кремния больших размеров в бассейновом реакторе ИРТ-Т.

Доказательство достоверности полученных результатов

Качество результатов подтверждается сопоставлением экспериментальных данных и численных расчётов. На их основе разработана и внедрена автоматизированная установка для ЯЛ кремния. Опыт эксплуатации в течение двух лет показал её высокую надёжность и эффективность. Выход в годность готовой продукции составил 100%.

Личный вклад автора состоит в том, что он лично проводил исследования по оптимизации зоны облучения и её нейтронно-физических характеристик, разработал алгоритм облучения, позволяющий повысить производительность установки, провел обработку экспериментальных результатов, а также принял активное участие в создании автоматизированной установки ЯЛ на реакторе ИРТ-Т ТПУ.

Апробация результатов работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на: VII, VIII, IX Международных конференциях по ядерной и радиационной физике (Алматы, 2009-2013 гг.), VIII Международной конференции по физико-техническим проблемам получения и использования пучков заряженных частиц, нейтронов, плазмы и электромагнитного излучения (Томск, 2009 г.), III, IV Российских научно-технических конференциях по физико-техническим проблемам получения и использования пучков заряженных частиц, нейтронов, плазмы и электромагнитного излучения (Томск, 2009-2010 гг.), V Международной научно-практической конференции по физико-техническим проблемам атомной энергетики и промышленности (Томск, 2010 г.), XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Современная техника и технологии» (Томск, 2013), International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (Tomsk, 2014).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ, включая 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, и 1 патент на изобретение.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Она изложена на 149 страницах, содержит 35 рисунков, 20 таблиц, и список цитируемой литературы из 100 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава носит обзорный характер и посвящена анализу существующих установок ЯЛ кремния на российских и зарубежных исследовательских ядерных реакторах (ИЯР).

В ней приведены параметры существующих устройств ядерного легирования кремния, рассматриваются их достоинства и недостатки. Сделан вывод, что в настоящее время в мире ощущается дефицит облучательных мощностей для ЯЛ кремния. Это связано с выводом из эксплуатации исследовательских реакторов, выработавших свой ресурс и с отсутствием специализированных аппаратов для этих целей. В то же время

происходит увеличение спроса на данный материал, который используется в промышленной и силовой электронике. Это обстоятельство требует создавать новые установки ЯЛ, а также развивать и модернизировать существующие на имеющихся аппаратах.

На основании обзора сформулированы уточнённые задачи, решение которых позволило создать установку на реакторе бассейнового типа ИРТ-Т.

Вторая глава содержит результаты исследований по оптимизации нейтронного поля при создании установки для ЯЛ кремния на ИЯР типа ИРТ-Т. Ранее эксплуатировалось устройство для ЯЛ слитков кремния диаметром до 4 дюймов длиной до 50 см [6]. В экспериментах на ИЯР выбор замедлителя всегда является решающим фактором в пространственном и энергетическом распределении нейтронов. В частности, нами рассмотрена задача создания установки для ЯЛ кремния в горизонтальном экспериментальном канале (ГЭК-4) в водо-водяном исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т ТПУ. С помощью пакета программ MCUSTPU [6] рассчитано нейтронное поле в различных замедлителях, сквозь которые проходит экспериментальный канал для ЯЛ кремния.

Расчёты проводились с целью оптимизации зоны облучения. Созданная ранее установка на канале ГЭК-4 [5] не соответствует по своим характеристикам современным требованиям, предъявляемым к технологии ЯЛ. В связи с этим нами были проведены исследования по созданию новой установки большей производительности, позволяющей легировать слитки кремния диаметром до 5 дюймов. Для этого была осуществлена оптимизация формы зоны облучения.

На рис. 1 приведена геометрия зоны облучения, по которой проводились расчеты.

АЗ 1 состоит из двадцати ТВС и бериллиевой «ловушки» тепловых нейтронов 2. Она с четырёх сторон окружена отражателем из бериллия 3, к которому примыкает замедлитель 5, с расположенным в нём горизонтальным экспериментальным каналом 4. Его внутренний диаметр равен 150 мм. Ось канала расположена на расстоянии 21 см от наружной грани активной зоны. Высота аппарата вдоль оси Y – 60 см. В горизонтальном сечении толщина отражателя 3 равна 7 см, АЗ 1 имеет размеры: 42 см (вдоль оси Z) и 28 см (вдоль оси Y). Суммарная толщина отражателя 3 и замедлителя 5 (вдоль оси Y) – 63 см, а ширина – 56 см (вдоль

оси Z). Все это окружено водой бассейна реактора.

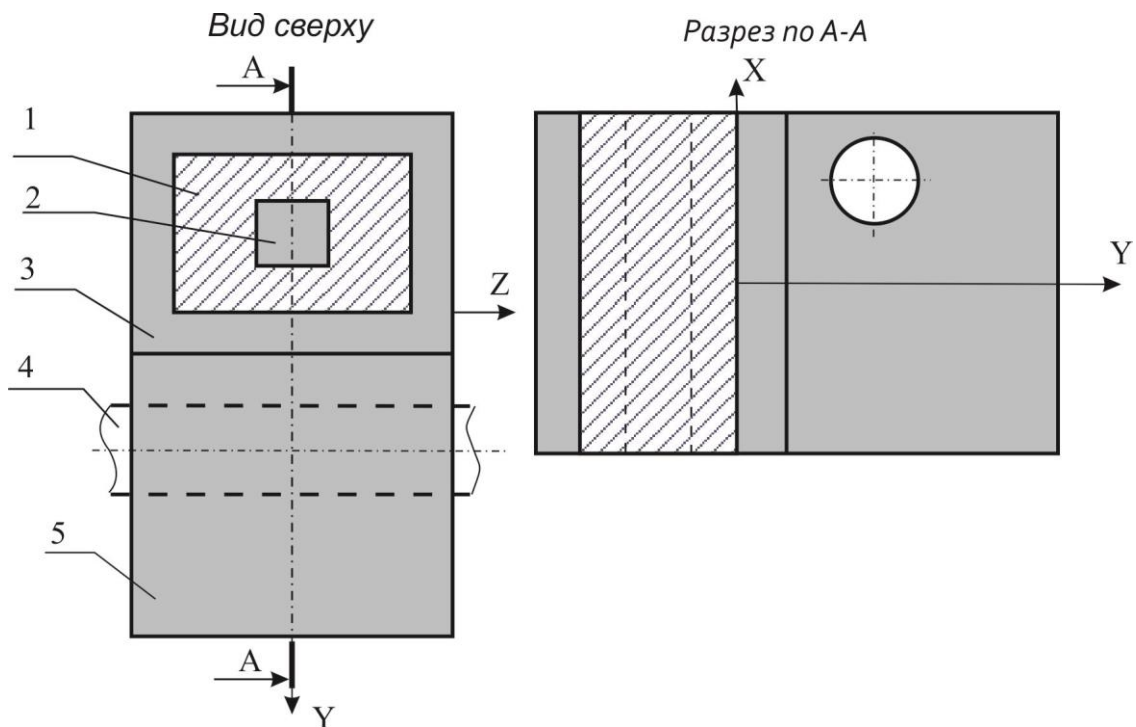


Рис. 1. Геометрия расчётов: 1 – активная зона АЗ (штрихом обозначены тепловыделяющие сборки ТВС); 2 – ловушка нейтронов; 3 – отражатель, 4 – горизонтальный экспериментальный канал ГЭК-4; 5 – замедлитель

В ходе расчётов для разных геометрий (канал располагался на различном удалении от грани АЗ) были получены спектры нейтронов в канале, распределение потока тепловых нейтронов, вдоль его оси и радиусу, определены спектральные коэффициенты.

Результаты приведены на рис. 2 и в таблице 1 (L – расстояние от края канала до активной зоны; φ_{cp} – средняя плотность потока нейтронов на длине 180 см; δ_{men} – доля тепловых нейтронов в спектре; D – радиальный разброс плотности потока тепловых нейтронов по диаметру слитка; Q – спектральный коэффициент – отношение плотности потока тепловых нейтронов к интегральной плотности потока нейтронов с энергией выше 3 МэВ).

Бериллий предпочтительней других замедлителей с целью достижения максимальной плотности потока тепловых нейтронов в канале, так как при малых размерах АЗ он обеспечивает максимальный коэффициент качества потока по резонансным и тепловым нейтронам.

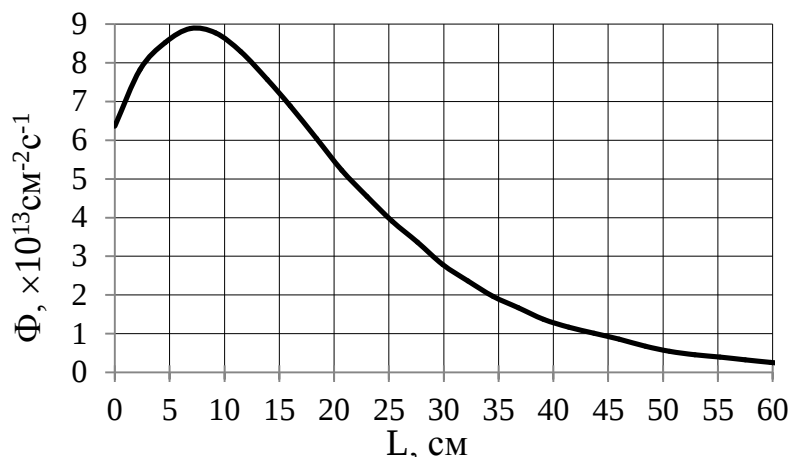


Рис. 2. Плотность потока тепловых нейтронов перпендикулярно грани активной зоны

Таблица 1 – Результаты расчетов поля тепловых нейтронов в горизонтальном экспериментальном канале ГЭК-4

$L, \text{ см}$	$\varphi_{\text{ср}}, 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	$\delta_{\text{мен}}, \%$	$D, \%$	Q
2	3,87	28,3	3,59	8,15
4	4,53	35,6	4,09	17,1
6	4,72	41,4	2,26	31,4
8	4,84	48	3,45	52,5
10	5,00	55	2,66	97,9
12	4,82	60	1,10	156
14	4,66	66	1,56	245
16	4,29	72	1,54	426
18	4,11	76	2,19	599
20	3,78	81	2,03	879
22	3,45	84	2,63	1453
24	3,08	87	2,18	1622
26	2,74	90	3,09	3442

Таким образом, при выборе места расположения экспериментального канала для НТЛ кремния необходимо руководствоваться следующими соображениями.

Во-первых, желательно иметь максимально возможную плотность потока тепловых нейтронов в зоне облучения.

Во-вторых, спектр нейтронов в зоне облучения кремния должен быть максимально термализован для уменьшения доли быстрых нейтронов, которые разрушают кристаллическую решетку кремния, генерируя радиационные дефекты.

Результаты, приведенные выше, показали, что нейтронно-физические характеристики существующей бериллиевой сборки подходят для создания

новой установки. С целью проверки корректности наших расчетов были проведены экспериментальные исследования нейтронного поля в ГЭК-4. При измерениях использовались методы нейтронно-активационного анализа. Для определения распределения потока тепловых нейтронов применялась методика относительных измерений. В качестве активационных детекторов использовались золотые фольги, медные диски и проволока, которые закреплялись на специальном устройстве и с помощью штанги подавались в канал реактора. С помощью золотых фольг определялось абсолютное значение плотности потока тепловых нейтронов по методу кадмиевой разности. Проволока помогала получить относительное распределение вдоль оси канала, а диски – радиальный разброс. На рис. 3 показана “геометрия” эксперимента.

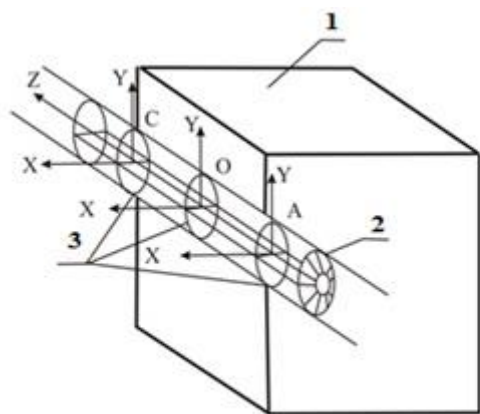


Рис. 3. Геометрии измерения распределения потока тепловых нейтронов в плоскостях A , O , C , перпендикулярных оси канала: 1 – активная зона, 2 – канал ГЭК-4, 3 – диски с закрепленными активационными детекторами

Специально разработанная компьютерная программа для управления приводами позволяла устанавливать устройство с установленными на нём детекторами в канале реактора с точностью до 1 мм.

Результаты измерений приведены на рис. 4 и 5.

Облучение активационных детекторов проводилось на мощности реактора 100 кВт в течение 30 минут. Затем результат приводился к мощности 6 МВт. После выдержки в течение 72 часов для распада короткоживущих изотопов мы вырезали из облучённой фольги, дисков и проволоки интересные участки, взвешивали и измеряли их наведённую активность на спектрометрической установке в одной и той же геометрии.

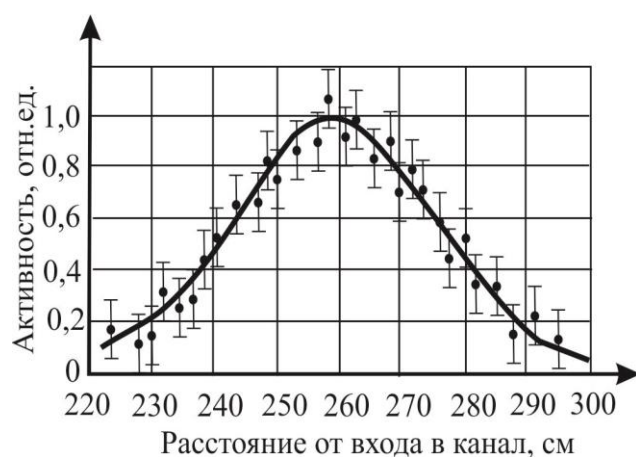


Рис. 4. Распределение плотности потока тепловых нейтронов по длине ГЭК-4

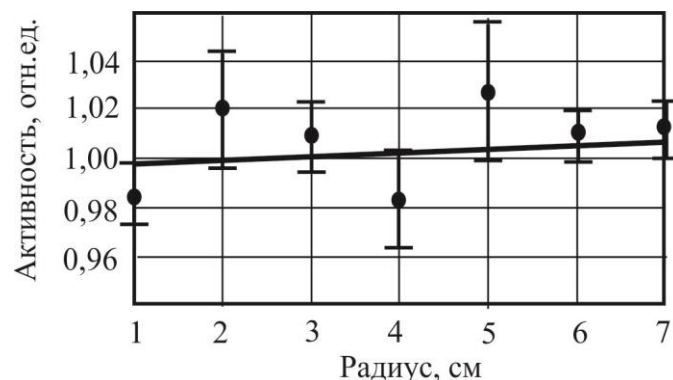


Рис. 5. Распределение тепловых нейтронов по диаметру контейнера

Как видно из рис. 5, в пределах погрешности измерений ($\pm 3\%$), активность медного диска была радиально однородной. С помощью активационных детекторов измерены характеристики нейтронного поля в ГЭК-4 (таблица 2).

Таблица – 2. Результаты измерений нейтронно-физических характеристик канала ГЭК-4

Т, К	$F_{\text{ср}}, 10^{12} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ (по длине зоны сканирования 180 см)	$\delta_{\text{теп}}, \%$	$\Phi_{\text{тн макс}}, 10^{13} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$	Q	Радиальная неравномерность по радиусу
337	4,1	73	1,56	106	< 3%

Результаты исследований, приведенные выше, позволили создать установку для НТЛ слитков кремния диаметром до 5 дюймов и длиной до 70 см, с объёмной неоднородностью легирующей добавки менее 5%.

Третья глава посвящена вопросам создания алгоритмов движения слитков по зоне облучения, позволяющих повысить производительность установки.

Для равномерного облучения объемных контейнеров в настоящее время используют два режима: статический и динамический. При статическом режиме контейнеры неподвижны во время облучения (могут вращаться вокруг своей оси). При динамическом – они участвуют в движении.

Большинство исследовательских реакторов имеют малые размеры активной зоны [4] и, как правило, нестационарные режимы работы. Поэтому в них при статическом режиме невозможно достичь высокой равномерности облучения нейтронами протяженных (до 500 мм и более) контейнеров с образцами большого диаметра (100 мм и более). Обеспечить однородность облучения материала, размеры которого сопоставимы с габаритами активной зоны аппарата, возможно лишь при использовании динамических режимов.

Одним из самых простых, технически осуществимых законов движения является равномерное перемещение образца с одновременным вращением вдоль канала облучения, т.е. точки в объеме контейнера с ним движутся по винтовым линиям.

Показано, что за счет вращения радиальная однородность облучения достигается не всегда.

Пусть распределение плотности потока нейтронов в зоне облучения имеет вид

$$f(x, y, z) = A + Bf_1(x) + Cf_2(y) + Df_3(z), \quad (1)$$

где A, B, C, D – постоянные коэффициенты, каждый из которых может быть равным и нулю; $f_1(x)$, $f_2(y)$ – нечётные функции, $f_3(z)$ – непрерывная функция относительно z .

Так как распределения плотности потока нейтронов в реакторе в форме прямоугольного параллелепипеда по координатам x, y имеют косинусоидальный характер [7], то в выражении (1) $f_1(x)$ и $f_2(y)$ обращаются в ноль, при условии, что за каждый проход по каналу через всю рабочую зону контейнеры совершают целое число оборотов. В этом случае флюенс нейтронов, набранный за все время облучения будет

$$\Phi(t_{обл}) = \int_0^{t_{обл}} f(x, y, z) dt = At_{обл} + \frac{nH}{v} \int_0^H f_3(z) dz, \quad (2)$$

где n – число проходов контейнера по каналу реактора за все время $t_{обл}$; H – длина зоны сканирования; H/v – время одного прохода.

По сути дела, мы определили критерий, с помощью которого следует формировать рабочую зону.

Аксиальная равномерность облучения достигается при любом распределении плотности потока нейтронов вдоль оси канала $f(x, y, z)$, если образцы возвратно-поступательно перемещать через зону облучения с постоянной скоростью v . Можно представить, что контейнер с пробами

состоит из тонких дисков. И все они последовательно, друг за другом, пересекают зону облучения. Если плотность потока нейтронов $f(x,y,z)$ не меняется во времени, то все эти диски будут облучены одним и тем же флюенсом нейтронов:

$$\Phi(x,y) = \frac{H}{v} \bar{f}(x,y), \quad (3)$$

где $\bar{f}(x,y)$ – средняя плотность потока нейтронов по зоне облучения

$$\bar{f}(x,y) = \frac{1}{H} \int_0^H f(x,y,z) dz. \quad (4)$$

Если $f(x,y,z)$ при любом z удовлетворяет (1), то и $\bar{f}(x,y)$ (свойство нечетных функций) входит в класс функций (1). Это обстоятельство также можно использовать для сокращения объема экспериментальных и расчетных работ при формировании зоны облучения.

Для создания механизма перемещения образцов через зону облучения необходимо принимать во внимание, что скорость линейного перемещения должна удовлетворять уравнению:

$$v = \frac{H}{t}, \quad (5)$$

где t – время движения контейнера в одну сторону, которое должно быть, как минимум, в несколько раз меньше периода наиболее высокочастотной флуктуации нейтронного потока. Только в этом случае можно считать, что за одну протяжку контейнер облучается стационарным потоком нейтронов. При работе реактора на постоянном уровне мощности заметное изменение потока тепловых нейтронов (порядка 1%) происходит, как правило, не быстрее, чем за десятки минут.

Для возвратно-поступательного движения линейная скорость перемещения образцов с угловой скоростью связаны соотношением:

$$\omega > \frac{2\pi v}{Hn\varepsilon}, \quad (6)$$

где ω – скорость вращения контейнеров с образцами; v – скорость поступательного движения облучателя; n – число проходов за всё время облучения; ε – параметр, характеризующий максимальное относительное изменение потока, при котором неравномерностью легирования можно пренебречь, лежит в пределах от 0,01 до 0,03.

Четвертая глава посвящена вопросам повышения эффективности использования нейтронного поля, расчету биологической защиты канала и созданию установки для ядерного легирования кремния, в ней рассмотрена система мониторинга плотности потока нейтронов. Приведены результаты обработки опытно-промышленной партии слитков кремния.

Обеспечить однородность облучения протяжённых контейнеров в пространственно-неоднородных нейтронных полях можно только при использовании динамических режимов. Причём, в этом случае она будет определяться как пространственно-временным распределением нейтронного поля, так и законом движения обрабатываемого образца. Для достижения аксиальной равномерности контейнер с образцами обычно возвратно-поступательно перемещают по каналу реактора. Как в прямом направлении, так и в обратном его двигают так, чтобы он полностью вышел из зоны облучения. Поэтому при каждом таком передвижении из одного крайнего положения в другое все элементарные объёмы в контейнере набирают один и тот же флюенс (независимо от распределения $f(z)$ вдоль канала реактора)

$$F_i = \frac{1}{V_i} \cdot \int_{z_1}^{z_2} f(z) dz, \quad (7)$$

где F_i – флюенс нейтронов, набранный при i -ом пересечении зоны облучения с постоянной скоростью V_i ; z_1 , z_2 – координаты начала и конца зоны облучения, которые выбирают так, чтобы потоком нейтронов за их пределами можно было пренебречь. При этом зона облучения заполнена контейнером с образцами лишь частично, что снижает эффективность использования нейтронов канала реактора.

Предлагается следующая модификация этого способа: по каналу реактора с распределением плотности потока нейтронов $f(z)$ возвратно-поступательно перемещаются не один контейнер, как в работе [5], а два (рис. 6).

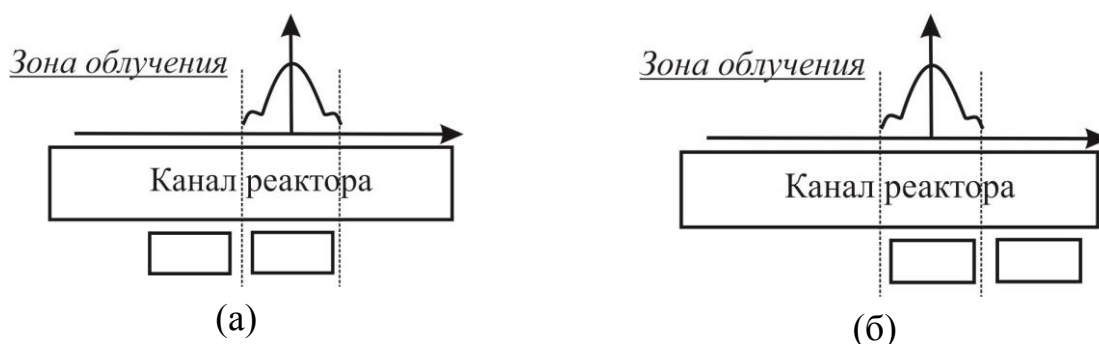


Рис. 6. Расположение двух контейнеров при их возвратно-поступательном перемещении

Перемещая их через зону, в крайних положениях центры каждого из них совмещают с центром зоны облучения. Такое движение осуществляют до тех пор, пока усредненный по объему флюенс нейтронов станет равным половине требуемого. Затем процесс прерывают, контейнеры меняют местами, сохраняя каждому из них прежнюю ориентацию в канале, и облучают оставшимся флюенсом.

Процесс прекращают после того, как они будут облучены второй половиной флюенса нейтронов. В этом способе зона облучения постоянно заполнена кремнием, если не учитывать зазор между контейнерами. При этом равномерность облучения такая же, как и в [5], а именно радиальная неоднородность менее 3%, аксиальная не превышает 5%, отклонение от номинала не более 8%.

Наша установка была смонтирована на канале ГЭК-4, предназначенном для легирования слитков кремния диаметром до 130 мм и длиной до 700 мм. Он окружён блоком защиты, позволяющим проводить работы в физическом зале ИРТ-Т. Внутри неё установлены устройства подачи контейнеров в канал, их загрузки и выгрузки, а также подачи в хранилище облучённого кремния (ХОК). Схема данных устройств показана на рис 7. Их характеристики приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики новой установки

амплитуда перемещения	1,8 м
скорость движения облучателя	18 м/ч
скорость вращения контейнеров	3 об/мин
время подачи контейнера из ХОК	2 мин
время подачи контейнера на облучатель	3 мин

Установка для ЯЛ предназначена для обработки потоком «тепловых» нейтронов различных материалов внутри активной зоны ядерного реактора. В основном она используется для обработки монокристаллического кремния.

Механическая часть устройства предназначена для доставки кремния в зону облучения ядерного реактора. Образцы помещаются в специальный контейнер, который представляет собой полый цилиндр внутренним размером 700×130 мм, закрывающийся с двух сторон крышками. Для их доставки в зону биологической защиты имеется транспортная тележка. Там при помощи перегрузочного устройства образцы перекладывают на штангу,

которая осуществляет доставку непосредственно в активную зону, где происходит облучение.

Электронная часть предназначена для контроля состояния узлов установки и управления исполнительными механизмами. Импульсы с конечных выключателей, датчиков перемещения, вращения и наличия обдува слитков, через схему подготовки сигналов, поступают на параллельный порт ввода. Оттуда они передаются в ЭВМ, где обрабатываются программой «Ядерное легирование кремния» и отображают состояние комплекса в каждый конкретный момент времени. В зависимости от этого и заданного алгоритма работы программа через шкаф управления выдаёт команды двигателям.

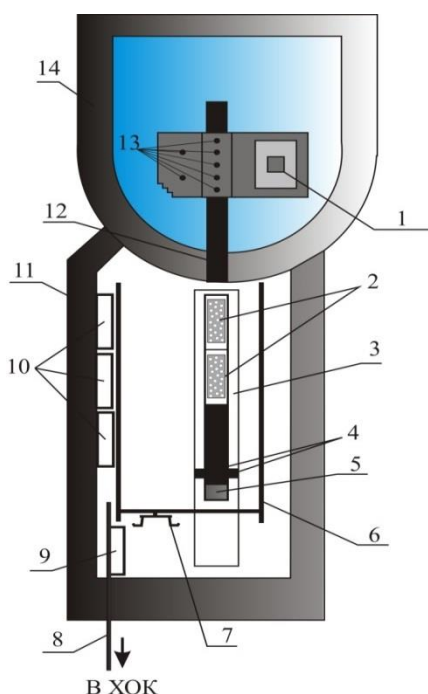


Рис. 7. Схема установки НТЛ слитков кремния на ГЭК-4 ИРТ-Т:

1 – Активная зона реактора; 2 – облучатель с контейнерами; 3 – направляющая облучателя; 4 – привод движения облучателя; 5 – привод вращения контейнеров; 6 – направляющая перегрузочного устройства; 7 – крюк перегрузочного устройства; 8 – транспортный путь; 9 – тележка; 10 – полки для контейнеров; 11 – биологическая защита установки; 12 – канал ГЭК-4; 13 – камеры деления КТВ-4; 14 – биологическая защита реактора.

На рис. 7 показан облучатель с контейнерами.



Рис.8 Облучатель с контейнерами

Механическая часть установки для облучения контейнеров со слитками кремния окружена защитой из тяжелого бетона.

Для защиты персонала от воздействия ионизирующего излучения была выбрана защита из бетона плотностью $\rho=4,6 \text{ т/м}^3$, толщина которой составила 76 см, что обеспечило дозовые нагрузки на её внешней стенке, сопоставимыми с дозами в физическом зале ядерного реактора, являющегося обслуживаемым помещением.

Система детектирования тепловых нейтронов в зоне облучения слитков кремния состоит из семи камер деления типа КТВ-4. Пять из них расположены непосредственно над каналом ГЭК-4. С их помощью контролируется распределение плотности потока тепловых нейтронов вдоль канала. Две камеры помещены в бериллиевый отражатель на одной высоте с ГЭК-4 на расстоянии 350 мм от его оси. Они откалиброваны на показание средней плотности потока тепловых нейтронов по всей зоне облучения слитков кремния и позволяют контролировать флюенс нейтронов с погрешностью 2%. Камеры КТВ-4 хорошо зарекомендовали себя в процессе эксплуатации.

Для проверки работоспособности созданного оборудования была обработана опытно-промышленная партия монокристаллического кремния. С целью определить радиальную однородность легирования была облучена партия слитков кремния на разный номинал конечного удельного электросопротивления. Затем они отжигались в печи СУЗН-1.6 при температуре 820 °С в течении двух часов, затем вместе с печью остывали до комнатной температуры. После этого определялись торцевые разбросы, а также отклонение от номинала легирования. На рис. 9 и 10 и в таблице 4 приведены результаты измерений у.э.с. слитков.

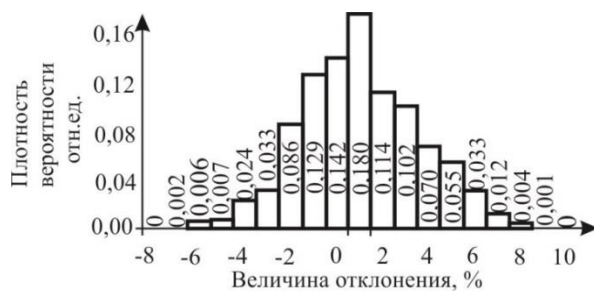


Рис. 9. Статистика отклонений у.э.с. от номинала на торцах слитков

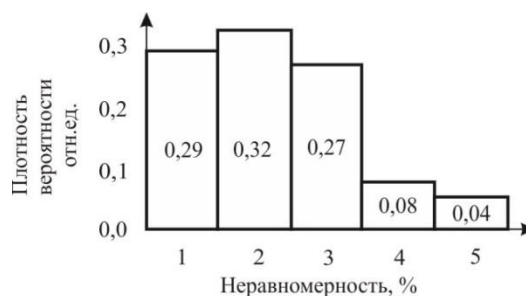


Рис. 10. Статистика неравномерности у.э.с. по длине слитков

Таблица 4 – Результаты легирования опытно-промышленной партии

№	Диаметр, мм	Длина, мм	Вес, г	Номинал, Ом·см	у.э.с., Ом·см		Радиаль- ный разброс, %		Отклонение от номинала, %		Время жизни, мкс	
					Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ	Верх	Низ
1	127	181	5342	170	162,0	164,0	0,8	2,8	4,7	3,5	1300	900
2	127	196	5785	170	163,0	162,0	0,7	0,5	4,1	4,7	1600	1900
3	127	164	4841	170	167,0	165,0	0,5	1,5	1,8	2,9	1000	800
4	127	168	4959	170	167,0	165,0	0,4	1,2	1,8	2,9	1000	1000
5	127	183	5401	170	166,0	164,0	0,5	1,2	2,4	3,5	400	1400

Из результатов (таблица 4) видно, что разброс у.э.с. по торцам слитков не превышает 3%.

На созданной установке постоянно выполняются хоздоговоры и контракты по легированию слитков кремния для Российских и зарубежных компаний.

На базе технологии ЯЛ были предложены методика и детекторы для определения флюенса быстрых и тепловых нейтронов с помощью монокристаллического кремния.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Создана и внедрена в эксплуатацию автоматизированная установка для ЯЛ кремния на базе горизонтального экспериментального канала ГЭК-4 исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т, которая позволяет проводить легирование слитков кремния диаметром до 13 см и длиной до 70 см.

2. Разработан алгоритм облучения, реализация которого позволяет повысить производительность установки в 2 раза.

3. Легирование опытно-промышленной партии монокристаллического кремния показало, объёмная неоднородность не превышает 5%. Производительность установки ЯЛ составляет 4 т в год на номинал 60 Ом·см.

4. Измерены нейтронно-физические характеристики бериллиевого замедлителя в горизонтальном экспериментальном канале ГЭК-4.

Оптимизирована зона облучения для легирования слитков кремния больших размеров.

5. Разработана система мониторингирования нейтронного поля на основе семи ионизационных камер типа КтВ-4. Она позволяет контролировать и оперативно корректировать процесс легирования кремния.

6. Разработана конструкция биологической защиты. Расчётным путём показано, что для установки ЯЛ кремния при мощности реактора 6 МВт достаточно защиты из тяжёлого бетона толщиной 75 см. Это позволило снизить дозовые нагрузки на работающий в зале персонал до допустимых значений.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Производство нейтронно-легированного полупроводникового кремния. / пер. с яп. М. С. Маяновского // Атомная техника за рубежом. – 2008. – № 4. – С. 20–29.
2. Смирнов Л.С., Соловьев С.П., Стась В.Ф., Харченко В.А. Легирование полупроводников методом ядерных реакций. – Новосибирск: Наука, 1981. – 175 с.
3. Нейтронное трансмутационное легирование полупроводников / под. ред. Дж. Миза. – М.: Мир, 1982. – 264 с.
4. Бать Г.А., Коченов А.С., Кабанов Л.П. Исследовательские ядерные реакторы. – М.: Атомиздат, 1985. – 278 с.
5. Varlachev V.A., Kuzin A.N., Lykhin S.V., Solodovnikov E.S., Fotin A.V., and Tsibul'nikov Y.A. Production of Silicon Neutron Transmutation Doping in a Research Reactor (Tomsk Complex) // Atomic Energy. – 1995. – Vol. 79. – No. 1. – pp. 38–40.
6. Гомин Е.А. Программа MCU5TPU // РНЦ “Курчатовский институт», институт ядерных реакторов. – М., 2007.
7. Бартоломей Г.Г., Бать Г.А., Байбаков В.Д., Алхутов М.С. Основы теории и методы расчёта ядерных энергетических реакторов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 511 с.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Емец Е.Г. Измерение абсолютного значения флюенса тепловых нейтронов монокристаллами кремния / Варлачев В.А., Емец Е.С., Солодовников Е.С. // Известия вузов. Физика. – 2011. – т.54. – №11/2. – С.114–117.

2. Емец Е.Г. Нейтронно-физические параметры исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т / Варлачев В.А., Головацкий А.В., Емец Е.Г., Солодовников Е.С., Усов Ю.П., Худолеев П.Н. // Известия вузов. Физика. – 2012. – т. 55. – №11/2. – С. 39–44.
3. Емец Е.Г. Нейтронное поле в различных замедлителях ядерного реактора ИРТ-Т / Варлачев В.А., Емец Е.Г., Солодовников Е.С. // Известия вузов. Физика. – 2012. – т. 55. – №11/2. – С. 45–47.
4. Патент РФ № 2472181, МПК: G 01 Т 3/08. Способ измерения флюенса тепловых нейтронов монокристаллическим кремнием. Варлачев В.А., Емец Е.Г., Солодовников Е.С. Заявлено 13.07.2011. Опубл. БИМП №1, 10.01.2013г.
5. Емец Е.Г. Получение высокоомного кремния путем нейтронного трансмутационного легирования / Варлачев В.А., Емец Е.Г., Солодовников Е.С. // Известия вузов. Физика. – 2009. – т. 52. – №11/2. – С. 409–412.
6. Емец Е.Г. Оперативный контроль плотности потока тепловых нейтронов в технологии НТЛ кремния / Варлачев В.А., Головацкий А.В., Емец Е.Г., Солодовников Е.С. // Известия вузов. Физика. – 2013, – т. 56. – №11/2. – С. 75–79.
7. Емец Е.Г. Новая установка для НТЛ кремния на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т / Варлачев В.А., Головацкий А.В., Емец Е.Г., Солодовников Е.С. // Известия вузов. Физика. – 2013, – т. 56. – №11/3. – С. 180–183.
8. Емец Е.Г. Влияние быстрых нейтронов на проводимость монокристаллического кремния. Детекторы быстрых нейтронов / Варлачев В.А., Дудкин Г.Н., Емец Е.Г., Солодовников Е.С. // Ядерная и радиационная физика: сборник докладов 7-ой международной конференции. – Алматы, Республика Казахстан, 2009. – С. 146–149.
9. Емец Е.Г. Детекторы тепловых нейтронов на основе простых полупроводников / Варлачев В.А., Емец Е.Г., Солодовников Е.С. // Ядерная и радиационная физика: сборник тезисов докладов 8-ой международной конференции. – Алматы, Республика Казахстан, 2011. – С.55–57.
10. Емец Е.Г. Автоматизированный комплекс для нейтронного легирования кремния / Варлачев В.А., Головацкий А.В., Емец Е.Г., Солодовников Е.С. // Ядерная и радиационная физика: сборник тезисов докладов 9-ой

- международной конференции. – Алматы, Республика Казахстан, 2013. – С.23–24.
11. Емец Е.Г. Автоматизированный комплекс для нейтронного легирования кремния / Варлачев В.А., Головацкий А.В., Емец Е.Г., Солодовников Е.С. // Ядерная и радиационная физика: сборник докладов 9-ой международной конференции. – Алматы, Республика Казахстан, 2013. – С.13–17.
 12. Емец Е.Г. Нейтронные поля в горизонтальном экспериментальном канале при различных конфигурациях замедлителя / Варлачев В.А., Емец Е.Г., Солодовников Е.С. // Современные техника и технологии: труды XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2013. – Т. 3. – С. 30–31.
 13. Емец Е.Г. Детектирование нейтронов монокристаллами кремния с омическими контактами / Варлачев В.А., Емец Е.Г., Солодовников Е.С. // Современные техника и технологии: труды XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2013. – Т. 3. – С. 32–33.
 14. Емец Е.Г. Использование монокристаллического кремния для детектирования быстрых и тепловых нейтронов / Варлачев В.А., Емец Е.Г., Солодовников Е.С., Пузыревич А.Г. // Физико-технические проблемы атомной энергетики и промышленности: сборник тезисов докладов V международной научно-практической конференции. – Томск, 2010. – С. 30.