

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЯДЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ СЛИТКОВ КРЕМНИЯ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА НА РЕАКТОРЕ ИВВ-2М

Дьяков А.А., Козлов А.В., Ланских В.Н.
(АО «ИРМ», Заречный Свердловской обл., Россия)

Введение

При производстве монокристаллов кремния методом Чохральского, особенно большого диаметра (более 150 мм), известна проблема обеспечения однородности легирования слитка как по его длине, так и по сечению. Эта проблема решается путем использования метода ядерного легирования кремния фосфором [1]. Метод ядерного легирования кремния основан на следующей ядерной реакции: изотоп ^{30}Si , поглощая нейтрон, превращается в изотоп ^{31}Si , который, распадаясь, превращается в стабильный изотоп ^{31}P . В результате получается кремний электронного типа проводимости с высокооднородным распределением легирующей добавки фосфора по объему слитка.

В России ядерное легирование кремния с наибольшим диаметром кристаллов 127 мм производится в Томском политехническом университете на реакторе ИРТ-Т (6 МВт). Ядерное легирование проводится в горизонтальном канале ГЭК-4 с внутренним диаметром 150 мм. Характеристики нейтронного поля в ГЭК-4: доля тепловых нейтронов в спектре – 73 %, спектральный коэффициент (отношение плотности потока тепловых нейтронов к интегральной плотности потока нейтронов с энергией свыше 3 МэВ) – 106, максимальная плотность потока тепловых нейтронов в канале с облучателем – $1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, средняя (по длине возвратно-поступательного перемещения контейнера, равной 110 см) плотность потока тепловых нейтронов – $4,1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, радиальная неравномерность флюенса нейтронов по радиусу слитка кремния при вращении контейнера диаметром 130 мм – менее 1 % [2]. Все это позволяет легировать кремний для применения в силовой электронике (удельное электрическое сопротивление, У.Э.С. ~ 60 Ом·см).

Для использования в солнечной энергетике необходим кремний с диаметром слитка 8–9 дюймов, У.Э.С. ~ 6 Ом·см и с отклонением У.Э.С. по диаметру слитка и по его длине не более 10 %. Наблюдается также рост потребности в кристаллах кремния большого диаметра и для силовой электроники [1].

На реакторе ИВВ-2М (15 МВт) в АО «ИРМ», г. Заречный Свердловской области, принципиально возможно облучение слитков или пластин кремния диаметром до 229 мм (9 дюймов) в двух вертикальных экспериментальных каналах (ВЭК-1,2), установленных за пределами активной зоны (А.З.) реактора (рис. 1).

Монокристаллический кремний в виде слитков или пакетов пластин, облученный в реакторе ИВВ-2М, должен обладать характеристиками, представленными ниже.

Целью данной работы являлось расчетное определение распределения плотности потока и флюенса нейтронов в кремниевых слитках диаметром 203–229 мм и высотой до 500 мм, облучаемых в ВЭК. Каналы окружены графитом.

ВЭК-1,2

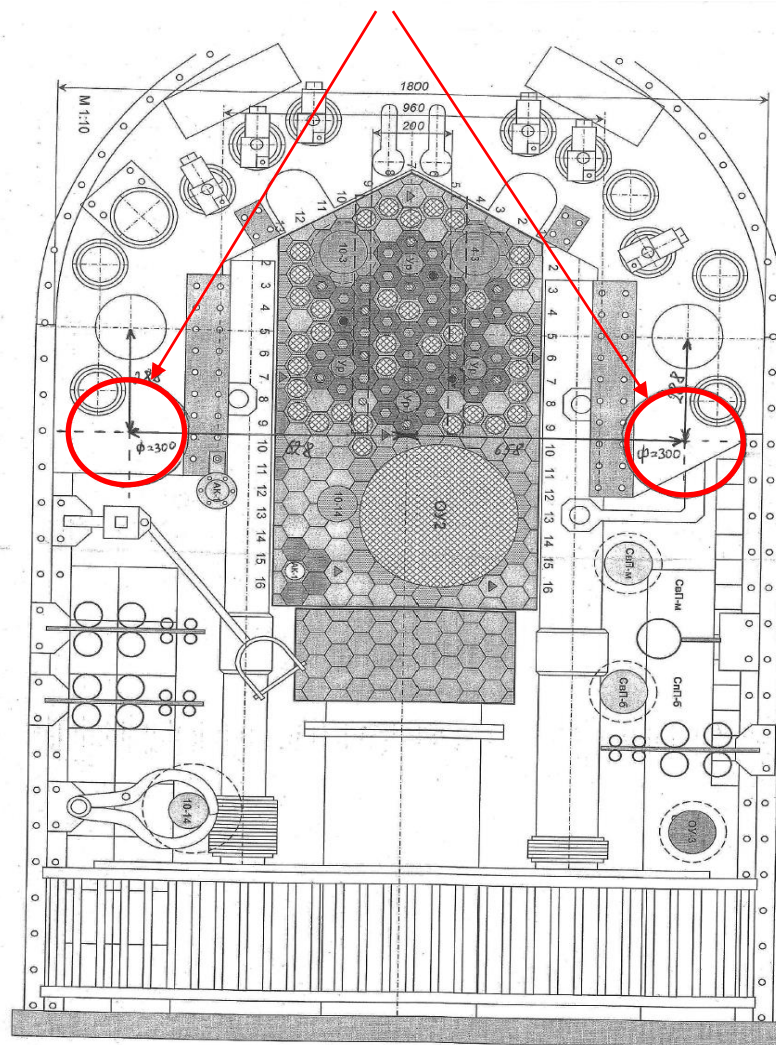


Рис. 1. Места размещения ВЭК–1,2 вне активной зоны реактора ИВВ-2М

Технические требования к ядерно-легированному кремнию

Диаметр	≤ 229 мм
Высота	≤ 500 мм
У.Э.С.	Задается для каждой партии в интервале от 6 до 250 Ом·см
Тип электропроводности	n
Отклонение от заданного номинала легирования	$\leq 10\%$
Допуск на разброс У.Э.С. по радиусу	$\leq 8\%$
Допуск на разброс У.Э.С. по высоте слитка или по отдельным пластинам	$\leq 10\%$

Расчетное исследование

Для математического моделирования использовался расчетный код MCU-RFFI/A с библиотекой констант DLC/MCUDAT-1.0, являющийся разработкой НИЦ «Курчатовский институт». Расчетный код MCU предназначен для решений уравнений переноса нейтронов методом Монте-Карло на основе оцененных ядерных данных для систем с произвольной трехмерной геометрией.

Построена математическая модель активной зоны реактора ИВВ-2М, вертикальных каналов и кремниевых слитков. ВЭК-1(2) представляет собой трубу, выполненную из алюминиевого сплава АД-1 с внутренним диаметром 239 мм и толщиной стенки 3 мм. ВЭК-1(2) является герметичным каналом, заполненным дистиллированной водой, в котором размещается кремниевый слиток диаметром 229 мм и высотой 500 мм в чехле из алюминиевого сплава АД-1 с толщиной стенки 2 мм. Схема расчетной модели представлена на рис. 2.

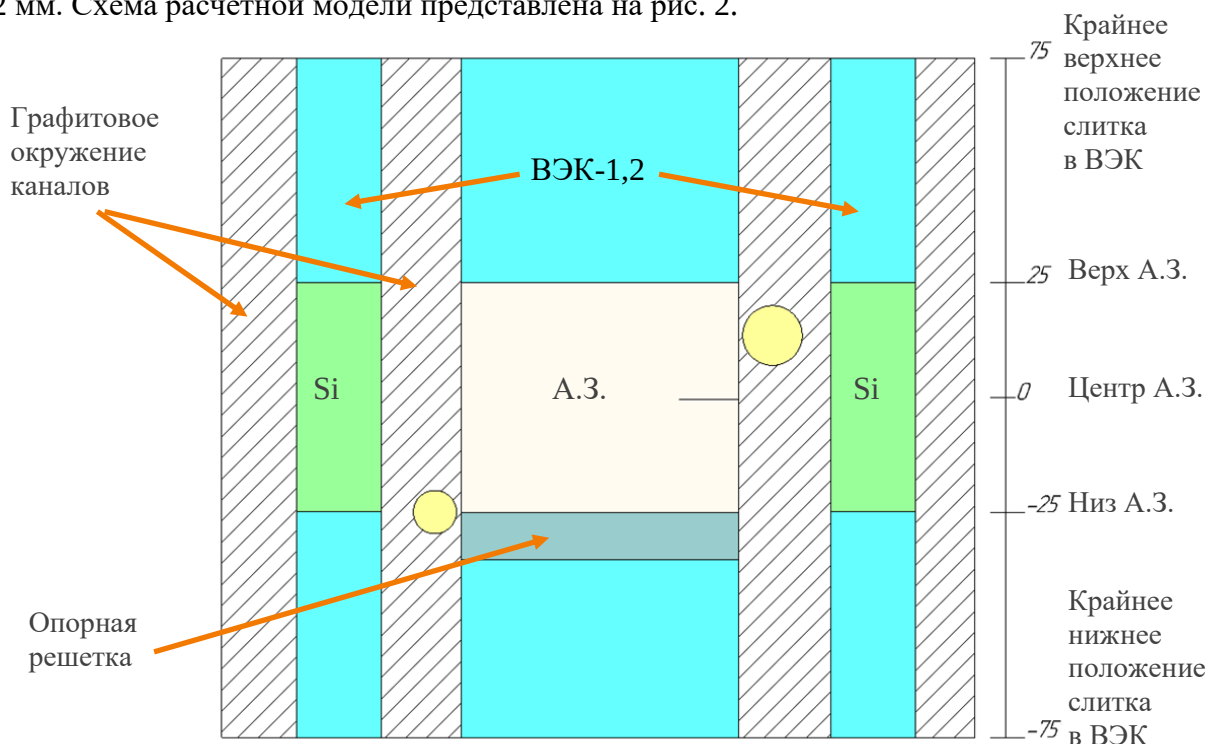


Рис. 2. Расчетная модель размещения ВЭК-1,2

Для расчета радиального распределения плотности потока нейтронов объем кремниевого слитка разделен на десять соосных кольцевых объемов одинаковой толщины. Для расчета высотного распределения плотности потока нейтронов объем кремниевого слитка разделен по высоте на слои, толщина каждого из которых составляет 50 мм. Диапазон перемещения слитков, установленных в ВЭК-1,2, составляет 1500 мм, поэтому расчет произведен для тридцати объемов. При этом распределение плотности потока нейтронов для первых десяти объемов соответствует распределению при крайнем нижнем положении слитка в ВЭК-1,2, а распределение для последних десяти объемов – при крайнем верхнем положении слитка. Слиток вращается вокруг своей оси и перемещается относительно активной зоны высотой 500 мм.

Результаты расчетов представлены на рис. 3–5. Средняя плотность потока тепловых нейтронов в слитке кремния на высоте его перемещения 1,5 м составила $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, спектральный коэффициент – 262. Относительная неравномерность плотности потока тепловых нейтронов по радиусу слитка кремния – около 6 %, объемная неравномерность флюенса тепловых нейтронов в слитке – около 10 %. Длительность облучения для достижения удельного электрического сопротивления $\sim 60 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (кремний для силовой электроники) не превысит 2 суток.



Рис. 3. Аксиальное распределение плотности потока тепловых нейтронов ($E < 0,625$ эВ) по кремниевому слитку в диапазоне его перемещения в ВЭК-1,2

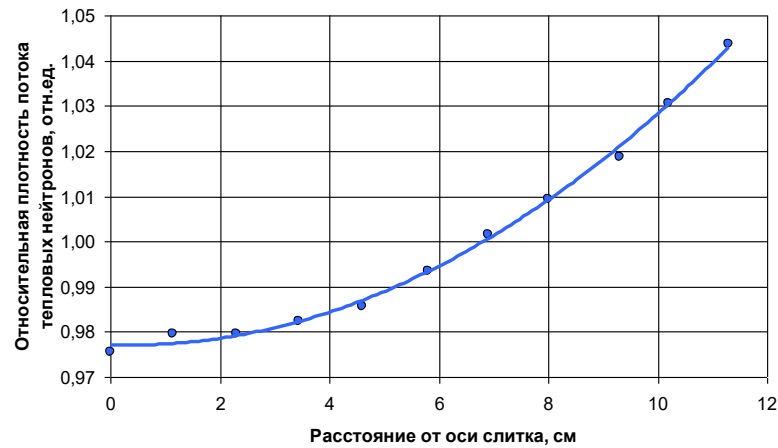


Рис. 4. Относительное радиальное распределение плотности потока тепловых нейтронов ($E < 0,625$ эВ) по кремниевому слитку в ВЭК-1,2

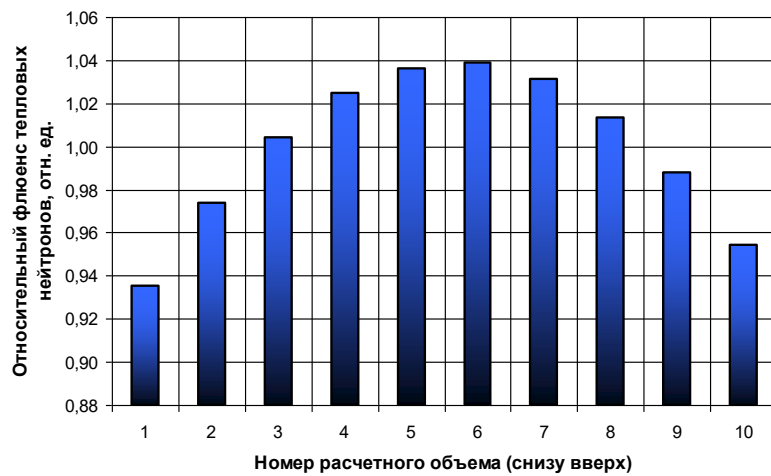
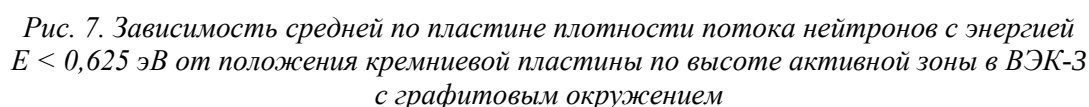


Рис. 5. Относительное распределение флюенса тепловых нейтронов ($E < 0,625$ эВ) по расчетным объемам кремниевого слитка в ВЭК-1,2

В бериллиевом отражателе можно сформировать водяную полость диаметром 400 мм, в которую устанавливается ВЭК-3 с графитовым замедлителем нейтронов. Однако, в отличие от ВЭК-1,2, канал в отражателе не может быть опущен ниже активной зоны. ВЭК-3 устанавливается на опорную решетку активной зоны. По этой причине в ВЭК-3 можно облучать относительно короткие слитки (до 250 мм) или пакеты пластин кремния. Вместе с тем максимальная плотность потока тепловых нейтронов здесь в 2 раза выше, чем в ВЭК-1,2. Результаты нейтронно-физических расчетов для ВЭК-3 приведены на рис. 7 и 8.



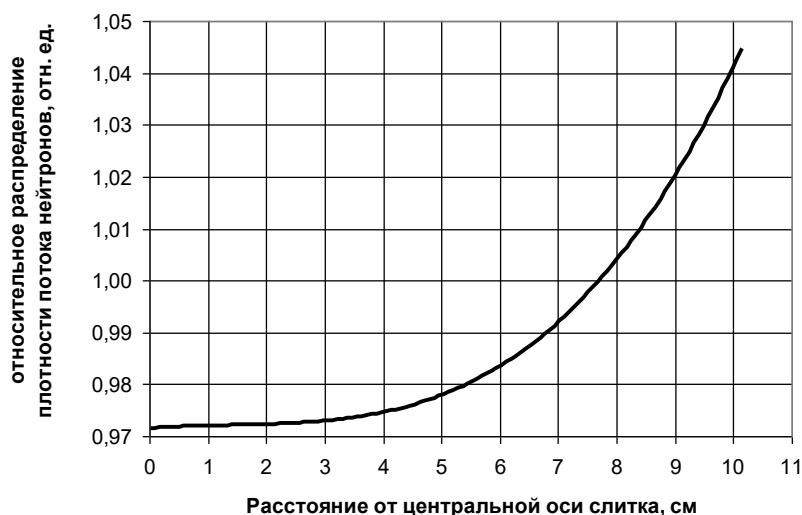


Рис. 8. Относительное радиальное распределение плотности потока нейтронов с энергией $E < 0,625$ эВ в кремниевой пластине в ВЭК-3 с графитовым окружением

При облучении кремния в ВЭК-3, как и в ВЭК-1,2, для обеспечения требуемой радиальной и аксиальной неравномерности флюенса нейтронов слитки или пакеты пластин необходимо вращать и перемещать по высоте активной зоны либо использовать поглощающие фильтры.

Закключение

Расчетными методами показано, что на реакторе ИВВ-2М принципиально возможно ядерное легирование кремния в виде слитков или пакетов пластин диаметром до 229 мм (9 дюймов) и высотой до 500 мм с обеспечением удовлетворительной радиальной (~ 6 %) и объемной (~ 10 %) неравномерности удельного электрического сопротивления.

Исходя из средней плотности потока тепловых нейтронов в зоне облучения ($5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$), длительность облучения в ВЭК-1,2 для достижения У.Э.С. ~ 60 Ом·см (кремний для силовой электроники) не превысит 2 суток.

Список литературы

1. Neutron transmutation doping of silicon at research reactors. – IAEA –TECDOC–1681. – IAEA, Vienna, 2012. 109 p.
2. Варлачев В.А., Емец Е.Г., Солодовников Е.С. Нейтронное поле в различных замедлителях ядерного реактора ИРТ-Т // Изв. Вузов. Физика, 2012. Т. 55. № 11/2. С. 45–47.