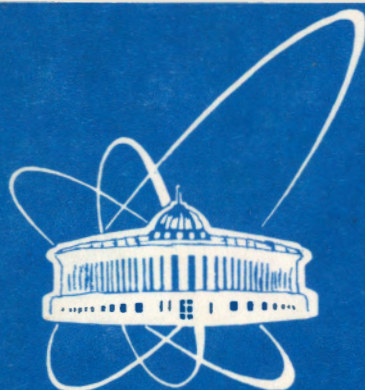


94-108



СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

18-94-108

В.В.Голиков, В.Л.Камионский, Е.Н.Кулагин,  
В.И.Лушиков, Е.П.Шабалин

УСТАНОВКА ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО  
ЛЕГИРОВАНИЯ КРЕМНИЯ ТЕПЛОВЫМИ  
НЕЙТРОНАМИ НА ПУЧКЕ N3 РЕАКТОРА ИБР-2

1994

## 1 Введение

Получение высококачественных полупроводниковых приборов требует использования монокристаллов кремния с однородным распределением легирующей примеси. В последнее десятилетие широкое развитие получил метод нейтронного трансмутационного легирования (НТЛ), позволяющий существенно (в 3÷4 раза) повысить однородность легирования по сравнению с металлургическими методами. В основе метода лежит ядерная реакция, протекающая в кремнии при облучении его тепловыми нейтронами: изотоп кремния  $^{30}\text{Si}$  после захвата теплового нейтрона и последующего бета-распада с периодом 2,6 часа превращается в фосфор  $^{31}\text{P}$  — легирующую примесь для кремния n-типа [1].

В настоящее время на ряде атомных реакторов введены в эксплуатацию установки по производству НТЛ-кремния в промышленных объемах. При промышленном использовании НТЛ речь идет об облучении монокристаллов кремния длиной несколько десятков сантиметров и диаметром 100 и более миллиметров. Понятно, что при НТЛ однородность нейтронного потока по всему объему монокристалла должна быть выше, чем требуемая однородность удельного сопротивления кремния.

Как правило, производится нейтронное легирование монокристаллов диаметром до 5 дюймов (127 мм). Однако современное приборостроение остро нуждается в монокристаллах НТЛ — кремния больших диаметров (от 5 до 10 дюймов). Помимо специфических сложностей, связанных с разработкой технологии легирования монокристаллов большого диаметра, главной проблемой являются конструктивные особенности существующих реакторов. Подавляющее большинство корпусных реакторов имеет облучательные каналы диаметром до 100 мм, и лишь небольшое число, в основном исследовательские реакторы, обладают каналами диаметром 150 и 250 мм. К числу таких реакторов относятся и ИБР-2, имеющий каналы с сечением  $200 \times 400$  и  $300 \times 400$  мм<sup>2</sup>.

Вместе с тем заранее определить возможности практического использования реактора ИБР-2 для нейтронного легирования кремния затруднительно по следующим причинам. Обычно в промышленных установках по легированию кремния используются реакторы на тепловых нейтронах, имеющие протяженные размеры активной зоны. При этом относительно нетрудно обеспечить высокую однородность потока нейтронов во всем объеме облучаемого кристалла. Реактор же ИБР-2 является источни-

ком быстрых нейтронов с очень компактной активной зоной и высоким градиентом нейтронного потока. Поэтому предварительно были выполнены научно-исследовательские работы, позволившие определить возможности использования пучка N3 реактора ИБР-2 для производства легированного кремния и требования к будущей установке. Суть этих работ сводилась к следующему: высокую однородность легирования можно получить и при большом, но постоянном осевом градиенте потока тепловых нейтронов за счет поворота кристалла на  $180^\circ$  после полупериода времени облучения. Радиальная однородность достигается вращением образца в аксиально-симметричном замедлителе.

## 2 Измерение пространственного и энергетического распределений потоков нейтронов в канале N3

В первую очередь были выполнены измерения пространственно-энергетического распределения первичного нейтронного потока в объеме канала  $200 \times 300 \times 900$  мм<sup>3</sup> со штатным водяным замедлителем ИБР-2. Энергетические спектры нейтронов были восстановлены по результатам нейтронно-

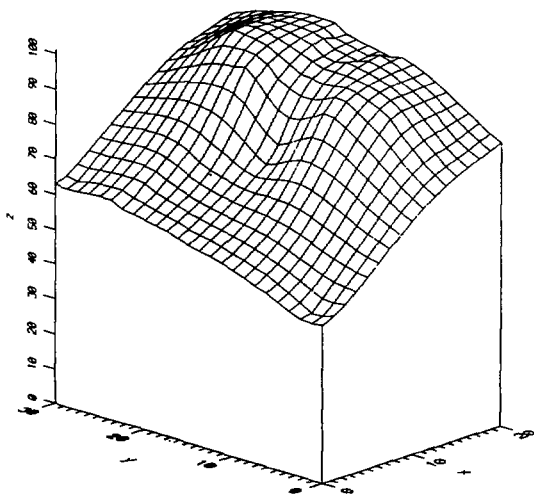


Рис 1. Распределение потока тепловых нейтронов по сечению канала в плоскости А, измеренное по наведенной активности  $\text{Sr-51}$  (в произвольных единицах). Размеры по ширине (x) и высоте (y) канала даны в см. Верхний левый угол канала (если смотреть от активной зоны реактора) соответствует началу отсчета координат.

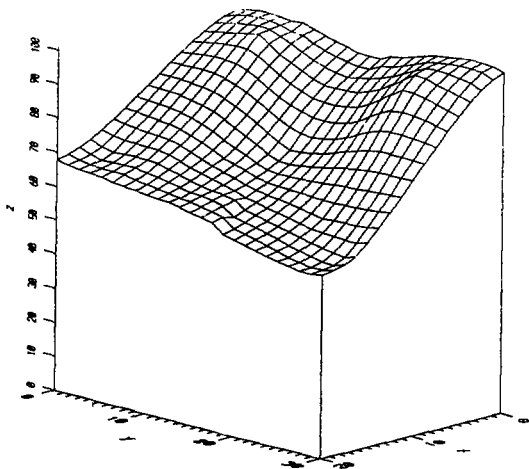


Рис 2. Распределение потока быстрых нейтронов по сечению канала в плоскости А, измеренное по наведенной активности Со-58 (в произвольных единицах). Размеры по ширине (x) и высоте (y) канала даны в см. Для лучшей наглядности рисунок по сравнению с предыдущим повернут на 180°.

активационного анализа образцов Ni, Al, Fe, Cr, In, Ti, Zn, Zr и Cu в точках А, В, С. Эти точки являлись центрами одноименных плоскостей, параллельных поверхности штатного замедлителя реактора и расположенных, соответственно, на расстоянии 20, 320 и 920 мм от замедлителя.

Измеренный в точке А спектр приведен в таблице; там же дан спектр, рассчитанный по методу Монте-Карло [2]. Спектры в точках В и С несколько мягче, чем в точке А, но различие небольшое, и в дальнейших расчетах оно не учитывалось. Плотность потока тепловых нейтронов в точке А при мощности реактора 2 МВт оказалась равной  $(2.2 \pm 0.1) \times 10^{12}$  н/см<sup>2</sup>с.

Пространственное распределение потоков быстрых и тепловых нейтронов в указанном выше объеме канала измерялось по наведенным активностям кобальта-58 и хрома-51 (из реакций  $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$  и  $^{50}\text{Cr}(n,\gamma)^{51}\text{Cr}$  соответственно) в нихромовой проволоке марки Х20Н80 и по активности натрия-24 в алюминии (из реакции  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ ). Всего было измерено более 800 образцов. На рис. 1-4 для примера приведены распределения потоков быстрых и тепловых нейтронов как по сечению канала в плоскости А, так и по его длине. Видно, что поток быстрых нейтронов значительно выше в левой части канала (если смотреть от активной зоны реактора).

Результаты этого этапа работы были использованы для расчета потока

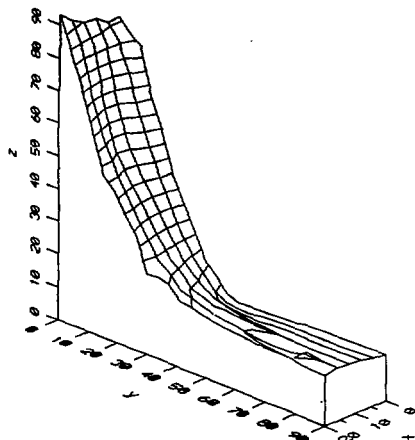


Рис 3. Усредненное по высоте распределение потока тепловых нейтронов по длине ( $y$ ) и ширине ( $x$ ) канала, измеренное по наведенной активности  $\text{Cs-51}$  (в произвольных единицах).

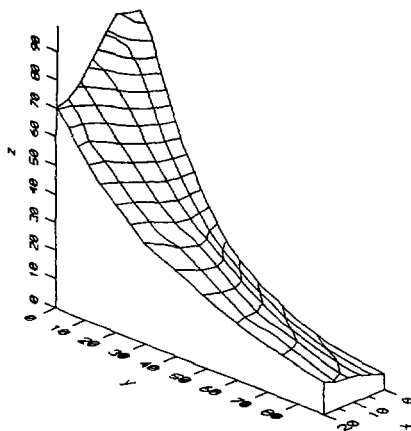


Рис 4. Усредненное по высоте распределение потока быстрых нейтронов по длине и ширине канала, измеренное по наведенной активности  $\text{Na-24}$  (в произвольных единицах).

нейтронов на поверхность дополнительного замедлителя в канале N3, который должен охватывать легируемый образец кремния. Знание потоков позволило оценить сравнительную эффективность различных вариантов расположения дополнительного замедлителя в канале.

Оказалось, что наибольшую производительность обещает вариант горизонтального расположения цилиндрического образца внутри замедлителя, охватывающего его по образующей. Такая геометрия дополнительного замедлителя использовалась во всех дальнейших экспериментах.

### 3 Профилирование потоков тепловых нейтронов в полиэтиленовом замедлителе

В качестве исходного замедлителя был взят цилиндрический блок из полиэтилена плотностью  $0.92 \text{ г/см}^3$  с внешним и внутренним диаметрами соответственно 194 и 124 мм и длиной 800 мм. Минимальное расстояние между торцом полиэтиленового блока и поверхностью штатного замедли-

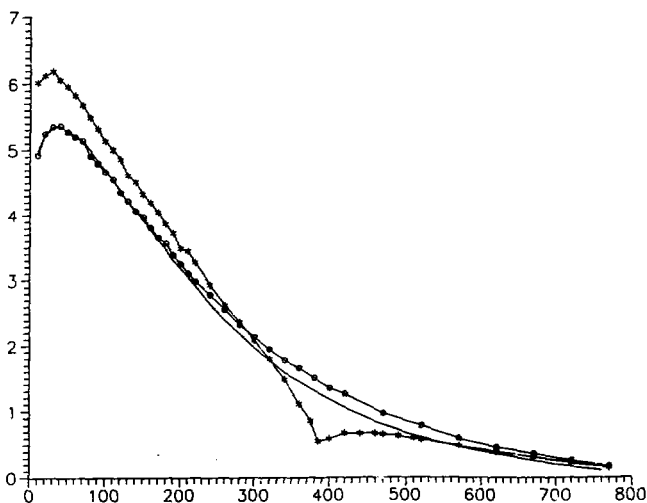


Рис 5. Распределение потока тепловых нейтронов (в единицах  $10^{12} \text{ н/см}^2\text{с}$ ) по длине образца.

- о-о-о — исходный замедлитель;
- \*\*\* — замедлитель с двумя профилирующими поглотителями;
- Сплошная кривая — расчет по методу Монте-Карло;

Длина образца приведена в миллиметрах.

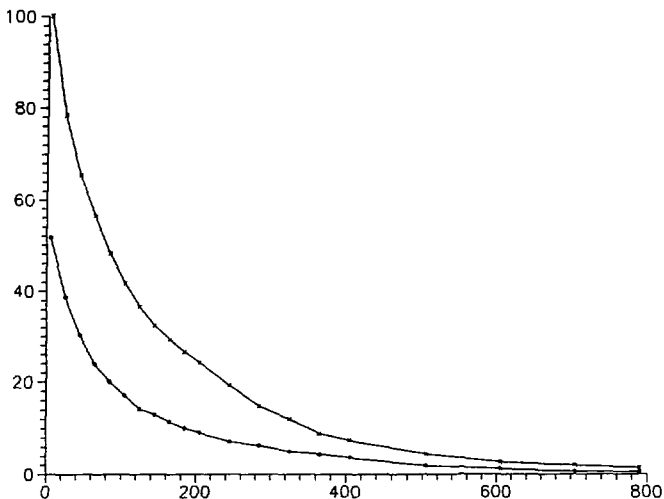


Рис 6. Распределение потока быстрых нейтронов на внешней поверхности полиэтиленового замедлителя, полученное по наведенной активности Со-58 в кольцах из нихромовой проволоки, охватывающих полиэтиленовый цилиндр (в произвольных единицах).

- x-x-x — левое полукольцо;
- \*-\*-\* — правое полукольцо (вид от активной зоны реактора).

теля составляло 50 мм. Кремний внутри блока имитировался цилиндром из алюминия марки АВ диаметром 120 мм.

Распределение по длине образца потока тепловых нейтронов, усредненного по внешнему кругу (из измерения активности хрома в кольце из нихромовой проволоки, охватывающем алюминиевый цилиндр), приведено на рис.5. Там же дана расчетная кривая, полученная по методу Монте-Карло на основе данных по току нейтронов на внешней поверхности блока (часть использованных при расчете данных о потоке быстрых нейтронов приведена на рис.6), которая достаточно хорошо совпала с экспериментом.

Прежде чем приступить к профилированию, были сделаны удачные попытки увеличить плотность потока тепловых нейтронов на образце.

Это было достигнуто двумя способами: придвижением полиэтиленового блока к реактору на 20 мм и установкой двух бериллиевых отражателей — торцового (который увеличивал поток нейтронов на правую часть торца блока) и в нижней части блока. Торцовый отражатель сечением  $80 \times 40 \text{ мм}^2$  имел высоту 200 мм, а центр нижнего отражателя размером  $200 \times 200 \times$

40 мм<sup>3</sup> находился на расстоянии 200 мм от переднего торца полиэтиленового блока. В результате поток тепловых нейтронов на образце увеличился на 15% по сравнению с исходным значением.

Расчетное профилирование замедлителя с целью получения линейного спада потока тепловых нейтронов по оси канала выполнялось с использованием специально созданных программ. Сначала по программе вычислений возмущения потока тепловых нейтронов от цилиндрически-симметричных локальных изменений геометрии или состава среды (по методу Монте-Карло) определялись "функции влияния" того или иного возмущения. Затем эти функции использовались в программе оптимизации (нахождение оптимального расположения и размера возмущений), которая была построена на основе комплекса программ для решения "обратной задачи", включающего, как базовую, программу ROLSM [3].

Было установлено путем расчета и проверено экспериментально, что профилирование (т.е. получение линейного спада тепловых нейтронов) за счет изменения сечения замедлителя неприемлемо. Исходная толщина замедлителя оказалась оптимальной, и поэтому ее значительное изменение при профилировании приводит к недопустимому увеличению доли быстрых нейтронов.

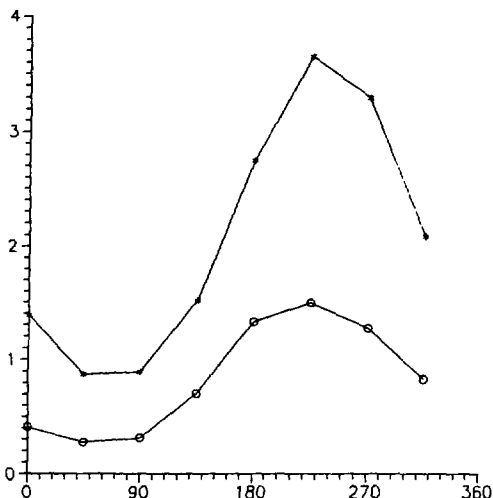


Рис 7. Азимутальное распределение потока быстрых нейтронов на поверхности замедлителя (в произвольных единицах).

- —•—• — на расстоянии 25 мм от переднего (к активной зоне) торца замедлителя;
- о-о-о — на расстоянии 145 мм от переднего торца замедлителя.



Наиболее удачным оказался вариант профилирования с помощью кольцевых поглотителей тепловых нейтронов, которые при соответствующем подборе их размеров не сильно искажают радиальное распределение потока (последнее должно быть близко к линейному на любом азимуте, что обеспечивает однородность легирования по радиусу при вращении образца). Размещение и толщина поглотителей были оптимизированы расчетным путем на максимум производительности легирования (т.е. максимум объемного интеграла от потока тепловых нейтронов по объему, в котором поток линейно зависит от координат).

Двух профилирующих поглотителей (титан диаметром 125 мм и толщиной 3 мм на переднем торце полиэтиленового блока и слой карбида бора диаметром 120 мм и толщиной 5 мм на расстоянии 380 мм от переднего торца блока) оказалось достаточно, чтобы распределение по длине образца плотности потока тепловых нейтронов разбилось на два прямолинейных участка с границей раздела в районе размещения поглотителя из карбида бора (см. рис.5). Отклонение потока тепловых нейтронов от линейности

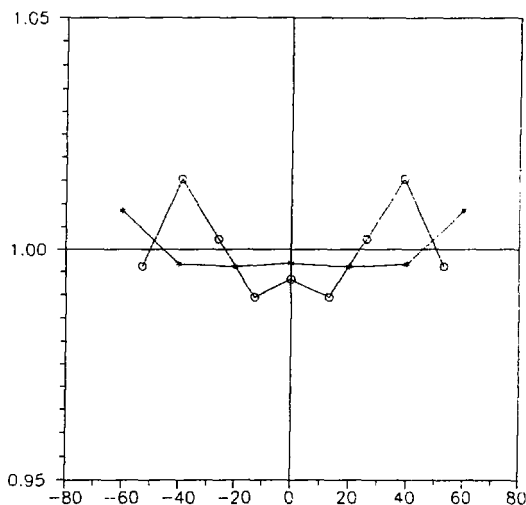


Рис 8. Распределение потока тепловых нейтронов (в произвольных единицах) по диаметру алюминиевого образца.

- о-о-о — на переднем (к активной зоне) торце образца;
- \*-\*-\* — на расстоянии 100 мм от переднего торца образца;

По оси абсцисс “-” (“+”) — расстояние в мм по вертикали вниз (вверх) от центра образца “0”.

на длине 350 мм в первом участке (от 30 мм до 380 мм) не превысило 2%; во втором участке  $\approx 2\%$  на длине 350 мм (от 450 мм до 800 мм). При этом в первом участке плотность потока тепловых нейтронов в максимуме составила  $(6,2 \pm 0,3) \times 10^{12}$  н/см<sup>2</sup>с; в среднем по линейной части —  $4 \times 10^{12}$  н/см<sup>2</sup>с; во втором участке — плотность потока тепловых нейтронов в среднем по линейной части составила  $4 \times 10^{11}$  н/см<sup>2</sup>с. Поскольку средняя величина потока тепловых нейтронов во второй части составила всего лишь  $\approx 10\%$  от величины потока в передней части, представляется технологически более удобным на первом этапе исследований ограничиться использованием для легирования кремния только одной передней линейной частью распределения потока тепловых нейтронов (без большой потери производительности).

Ввиду того, что ток (поток) быстрых нейтронов на цилиндрической поверхности блока имеет сильную зависимость от азимутального угла (рис.7) и имеется утечка с торцов блока, большое внимание уделялось радиальному распределению потока тепловых нейтронов в образце. При выбранных параметрах профилирующих элементов неоднородность по радиусу составила —  $\pm 1.5\%$  вблизи торцов леглируемого образца и  $\pm 1\%$  — в основной массе (рис.8).

Таким образом ожидаемая суммарная неоднородность легирования не превысит  $\pm 5\%$  (при условии гашения образца вокруг оси и двукратного облучения с переворотом на  $180^\circ$ ).

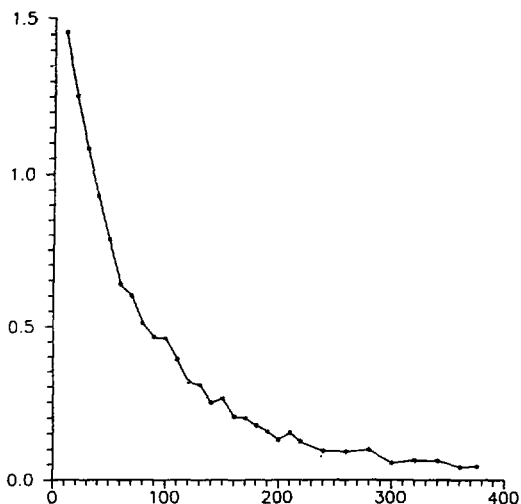


Рис 9. Распределение потока быстрых нейтронов (в единицах  $10^{12}$  н/см<sup>2</sup>с) по длине образца диаметром 120 мм.

Важной характеристикой процесса легирования является отношение потока тепловых нейтронов к быстрым внутри легируемого образца. На рис.9 представлено распределение потока быстрых нейтронов по длине алюминиевого образца при наличии профилирующих поглотителей. Из анализа данных рис.5 и рис.9 следует, что отношение потока тепловых нейтронов к быстрым ( $E > 0,8$  МэВ) переменено по длине образца и составляет от 12 на торцах до 40 в середине (при двукратном облучении с переворотом на  $180^\circ$ ).

#### 4 Попытка профилирования потока тепловых нейтронов на образце большого диаметра

После успешного профилирования потока тепловых нейтронов на образце диаметром 120 мм была предпринята попытка профилирования потока на образце большого диаметра. В этом эксперименте полиэтиленовый замедлитель представлял собой профилированный цилиндр длиной 800 мм и внешним диаметром 235 мм, усеченный с боков до 196 мм, чтобы вписаться в горизонтальные размеры канала N3 (200 мм). Внутри цилиндра имелся полый канал диаметром 160 мм, по оси которого размещался тот же алюминиевый образец диаметром 120 мм, что и в предыдущих измерениях. Профилирующие элементы (титан и карбид бора) имели диаметр 160 мм и устанавливались на тех же расстояниях, что и раньше. Получен-

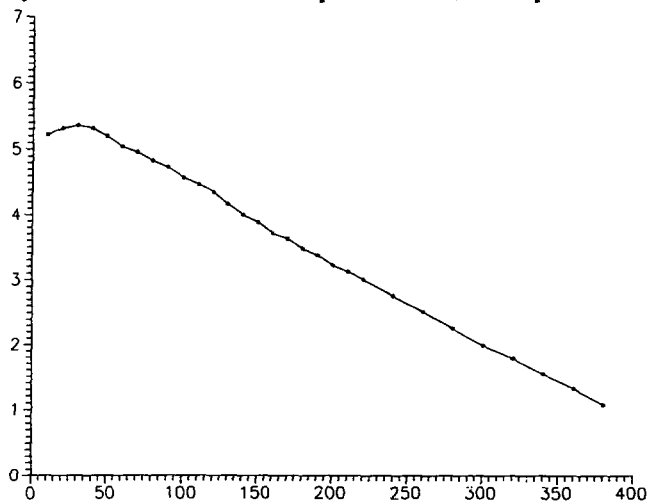


Рис 10. Распределение потока тепловых нейтронов (в единицах  $10^{12}$  н/см<sup>2</sup>с) по длине образца диаметром 160 мм

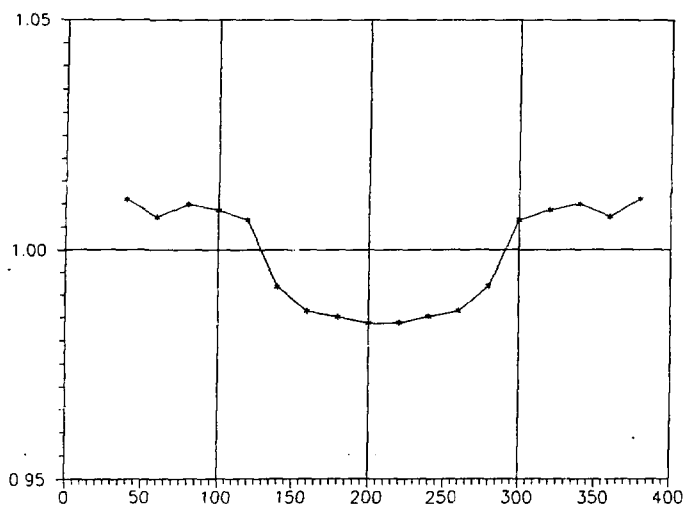


Рис 11. Распределение потока тепловых нейтронов (в произвольных единицах) по длине образца диаметром 160 мм при двукратном облучении с переворотом на  $180^\circ$ .

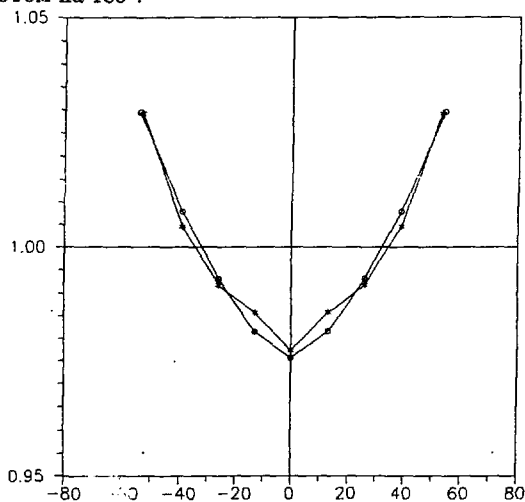


Рис 12. Распределение потока тепловых нейтронов (в произвольных единицах) по диаметру алюминиевого образца в канале диаметром 160 мм.

- \*-\*-\* — на расстоянии 123 мм от переднего торца;
- o-o-o — на расстоянии 223 мм от переднего торца.

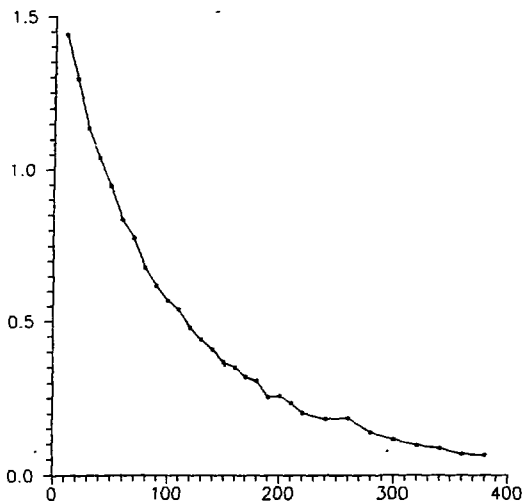


Рис 13. Распределение потока быстрых нейтронов (в единицах  $10^{12}$  н/см<sup>2</sup>с) по длине образца диаметром 160 мм.

ное при этом распределение по длине образца плотности потока тепловых нейтронов оказалось довольно линейным (рис.10), так что при двукратном облучении с переворотом на  $180^\circ$  вокруг отметки 210 мм на длине от 40 до 380 мм неоднородность легирования не превысит  $\pm 2\%$  (рис.11). Среднее по длине образца снижение плотности потока тепловых нейтронов по сравнению с образцом диаметром 120 мм составило 12%.

Радиальное распределение потоков тепловых нейтронов в образце диаметром 160 мм (рис.12) оказалось несколько хуже, чем в образце диаметром 120 мм:  $\pm 2,5\%$  — в основной массе образца и  $\pm 5\%$  — вблизи торцов леглируемого образца, однако радиальная неоднородность на торцах может быть уменьшена либо путем профилирования поглотителя, либо уменьшением длины образца. Распределение потока быстрых нейтронов по длине образца приведено на рис.13. В связи с уменьшением эффективной толщины замедлителя на боках цилиндра отношение потока тепловых нейтронов к быстрым ухудшилось примерно в  $1,5 \div 2$  раза.

## 5 Контрольное легирование монокристалла кремния

С целью проверки результатов предварительных опытов было проведено пробное легирование монокристаллического слитка кремния, полученного

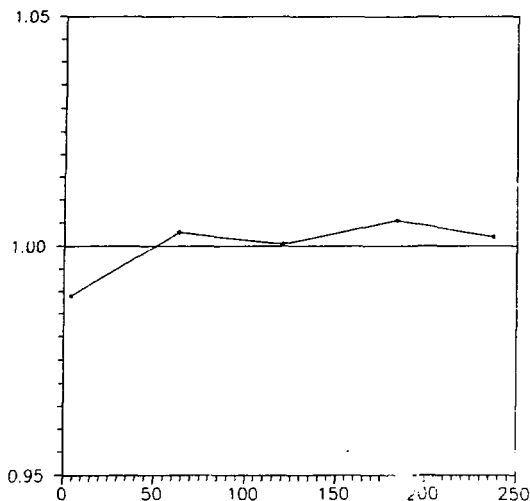


Рис 14. Распределение потока тепловых нейтронов (в произвольных единицах) по длине легированного образца кремния при двукратном облучении с переворотом на  $180^\circ$ .

методом зонной плавки. В опытной установке полиэтиленовый замедлитель, описанный в разделе 3, был заменен на водяной тех же размеров и с теми же профилирующими элементами. Кроме этого было использовано приспособление для вращения образца со скоростью 40 оборотов в час во время облучения.

Монокристалл кремния представлял собой цилиндр диаметром 61 мм и длиной 242 мм со следующими исходными данными: удельное сопротивление на верхнем торце слитка — 417 Ом·см, на нижнем торце — 277 Ом·см, т.е. начальный разброс удельного сопротивления составлял  $\approx 30\%$ . Слиток располагался в центре объема облучения (передний торец слитка находился на расстоянии 69 мм от переднего торца замедлителя); остальное пространство в сухой полости замедлителя занимал алюминий марки АМГ.

Как показал предварительный эксперимент на этой установке, снижение потока тепловых нейтронов из-за уменьшения эффективной толщины замедлителя (вода вместо полиэтилена) составило  $\approx 15\%$ , и средняя плотность потока на слитке —  $3,4 \times 10^{12}$  н/см<sup>2</sup>с. Слиток облучался в течение 15 час 51 мин при первой загрузке и 15 час 23 мин при повторной загрузке, когда он был повернут другим торцом к зоне.

Время второго облучения было определено непосредственно в ходе облучения усреднением показаний мониторов (они разошлись на  $\approx 3\%$ ). На

рис.14 приведено относительное распределение флюенса тепловых нейтронов по длине образца, измеренное по наведенной активности  $^{51}\text{Cr}$  в кольцах из никромовой проволоки, расположенных на облучавшемся монокристалле кремния.

Измерения электрических параметров легированного слитка, выполненные на Подольском химико-металлургическом заводе после отжига образца, показали, что среднее удельное сопротивление составило 61 ом см с разбросом  $\pm 4\%$ , что соответствует марке КОФ 60-70 ГОСТа для нейтронно-легированного кремния.

## 6 Установка для нейтронного легирования кремния в промышленных масштабах

Проведенные исследования установили возможность практического применения пучка N3 реактора ИБР-2 для нейтронного легирования кремния в промышленных масштабах, используя при этом основные механические узлы канала УХН. Схема установки приведена на рис.15.

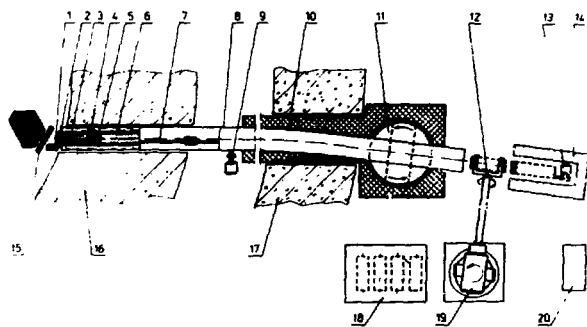


Рис 15. Схема установки по нейтронному легированию кремния в промышленных масштабах. 1 — торцевой бериллиевый отражатель; 2 — титан; 3 — водяной замедлитель; 4 — легируемый образец; 5 — карбид бора; 6 — транспортная каретка; 7 — привод перемещения каретки с образцом; 8 — транспортный трубопровод; 9 — электродвигатель системы медленного вращения образца; 10 — подвижная защита; 11 — защитный шибер; 12 — система перегрузки образца; 13 — электродвигатель системы перемещения каретки с образцом; 14 — приемное защитное устройство; 15 — водяной замедлитель ИБР-2; 16, 17 — стационарная защита; 18 — место хранения образцов; 19 — промышленный робот "Луч"; 20 — пульт управления установкой.

Установка состоит из следующих основных узлов:

- расположенный вблизи штатного замедлителя водяной замедлитель с сухой полостью внутри и с профилирующими нейтронное поле элементами;
- капсула с образцом кремния;
- механизмы вращения образца и его транспортировки из экспериментального зала в полый канал замедлителя и обратно;
- механизм перемещения водяного замедлителя к активной зоне реактора и обратно;
- система подачи воды в замедлитель;
- устройство для поворота кремния на  $180^\circ$  и дистанционной смены образцов, включающее в себя промышленный робот "Луч";
- монитор нейтронов;
- электрическая система управления установкой;
- пульт управления установкой с системой сигнализации исполнения команд оператора;
- защита установки.

Водяной замедлитель представляет собой профилированный цилиндр длиной 800 мм и внешним диаметром 220 мм, усеченный по бокам до 196 мм. Внутри цилиндра имеется полый канал диаметром 130 мм. Материал стенок замедлителя — алюминий марки АМГ-6 толщиной 2 мм (кроме торцов). Проточная вода для заполнения цилиндра поступает из контура штатных замедлителей ИБР-2. Контроль поступления воды в замедлитель осуществляется датчиком протока воды. Для увеличения потока нейтронов со стороны активной зоны реактора на торце водяного замедлителя размещается бериллиевый отражатель сечением  $60 \times 40 \text{ мм}^2$  и высотой 220 мм, а под замедлителем на расстоянии 200 мм от переднего торца размещен бериллиевый отражатель размером  $200 \times 200 \times 40 \text{ мм}^3$ .

Внутри водяного замедлителя в полном канале размещается в тонкой алюминиевой капсуле легируемый образец кремния с максимальными размерами: диаметр 127 мм, длина 360 мм. Для устранения аксиальной неоднородности капсула с образцом в процессе облучения вращается со скоростью 35 оборотов в час. Вплотную к капсуле с кремнием находятся профилирующие нейтронное поле элементы: со стороны активной зоны — пластина



титана толщиной 3 мм и диаметром 140 мм, с противоположной стороны — слой карбида бора толщиной 5 мм и диаметром 130 мм.

После набора заданного флюенса нейтронов (по показаниям монитора) капсула с легируемым кремнием вместе с транспортной кареткой извлекается из полости замедлителя и по транспортному трубопроводу перемещается в экспериментальный зал в приемное защитное устройство. Наиболее близко расположенная к водяному замедлителю головная часть транспортного трубопровода представляет собой прямолинейный отрезок алюминиевой трубы марки АМГ-6 длиной 2,5 м и внутренним диаметром 185 мм; далее трубопровод того же диаметра из нержавеющей стали плавно изогнут с радиусом кривизны  $\approx 30$  м. Изогнутая часть трубопровода резко уменьшает фон быстрых нейтронов и  $\gamma$ -лучей в экспериментальном зале во время перемещения капсулы с кремнием. Общая длина транспортного пути  $\approx 9$  м. На расстоянии 0,5 м от поверхности штатного замедлителя скорость перемещения образца кремния составляет 1,5 м/мин, далее — 4 м/мин.

На конце изогнутого трубопровода в экспериментальном зале установлен вращающийся защитный шибер длиной  $\approx 1$  м для уменьшения фона во время проведения персоналом работ по смене образца. Приемное защитное устройство содержит автоматические приспособления, позволяющие оператору дистанционно извлекать легированный образец из капсулы и вставлять в капсулу новый образец. Оно окружено свинцовой защитой толщиной  $\approx 150$  мм от  $\gamma$ -излучения, наведенного в материале транспортной каретки. Операции поворота образца на  $180^\circ$  для повторного легирования, удаления легированного образца с транспортного пути и перемещения его в защитное хранилище, а также установка на транспортный путь нового образца осуществляются при помощи промышленного робота "Луч-05".

Сигнализация об исполнении команд оператора (поступление каретки в приемное устройство, извлечение образца из капсулы и его поворот на  $180^\circ$ , помещение образца в капсулу и его перемещение в полость водяного замедлителя) выводится на пульт управления установки. Сюда же выводится также информация о вращении образца при его облучении, число совершенных оборотов и текущие показания нейтронного монитора.

Во избежание излишней активации в нерабочем состоянии установка находится на расстоянии 3 м от активной зоны реактора в кольцевом коридоре. В это время пучок N3 перекрыт защитным шибером реактора. В рабочем режиме установка перемещается почти вплотную к замедлителю реактора — минимальное расстояние между поверхностью штатного замедлителя и торцом бериллиевого отражателя 12 мм. Система перемещения установки позволяет также выдвигать всю установку вместе с подвижной защитой полностью в экспериментальный зал для проведения крупных про-

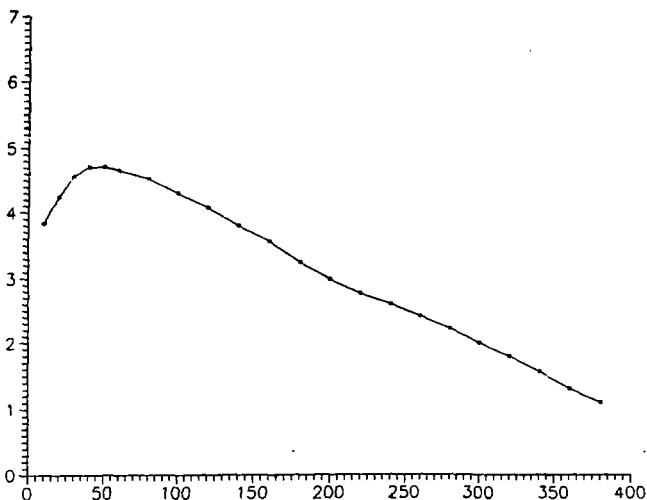


Рис 16. Распределение потока тепловых нейтронов (в единицах  $10^{12}$  н/см<sup>2</sup>с) по длине образца в установке по легированию кремния в промышленных масштабах.

филактических работ: в это время отверстие в биологической защите реактора закрывается защитной пробкой, а головная часть установки окружается дополнительной свинцовой защитой.

Проведены пробные сеансы облучения образцов кремния при мощности реактора 100 кВт с целью определения основных эксплуатационных характеристик установки.

В этих экспериментах в капсулу помещались два монокристалла кремния. Первый монокристалл представлял собой цилиндр диаметром 64 мм и длиной 174 мм. Передний торец слитка находился на расстоянии 37 мм от переднего торца замедлителя. Вплотную к заднему торцу этого монокристалла примыкал второй цилиндрический образец кремния диаметром 100 мм и длиной 191 мм. Оба слитка находились на оси капсулы. Остальное пространство капсулы занимал алюминий марки АМГ.

Полученное при этом распределение по длине капсулы потока тепловых нейтронов показано на рис.16. Ожидаемая неоднородность легирования не превысит  $\pm 3\%$  при двукратном облучении с переворотом на  $180^\circ$  вокруг отметки 220 мм на длине от 40 до 400 мм. При этом плотность потока тепловых нейтронов в максимуме составила  $(4,7 \pm 0,3) \times 10^{12}$  н/см<sup>2</sup>с, а в среднем по линейной части -  $3,0 \times 10^{12}$  н/см<sup>2</sup>с. Отношение потока тепловых

нейтронов к быстрым переменю по длине образца и составляет от 13 на торцах до 48 в середине при двукратном облучении с переворотом катушки на 180°.

Следует отметить, что использование линейно спадающего нейтронного поля позволяет исправить начальный разброс в проводимости облучаемого образца.

## 7 Заключение

Созданная на пучке N3 реактора ИБР-2 установка по легированию кремния тепловыми нейтронами в промышленных масштабах обладает следующими характеристиками:

- Средняя плотность потока тепловых нейтронов  
в объеме  $5 \times 10^3 \text{ см}^3$  —  $3,0 \times 10^{12} \text{ в/см}^2\text{с}$
- Максимальные размеры легируемого слитка:
  - 1) диаметр — 127 мм (5 дюймов)
  - 2) длина — 360 мм
- Однородность легирования — не хуже 5%
- Температура слитка при облучении —  $< 100^\circ\text{C}$
- Отношение потоков тепловых и быстрых нейтронов —  $13 \div 48$
- Годовая производительность при легировании образцов до удельного сопротивления 100 Ом·см (от 1000 Ом·см) (при 2250 часах работы реактора ИБР-2) — 1200 кг

Авторы выражают искреннюю благодарность В.Л.Аксенову, поддержка которого была решающей для выполнения данной работы, В.М.Назарову за предоставление возможности спектрометрических измерений и коллективу ИБР-2 за обеспечение необходимых режимов работы реактора.

## Приложение

Концентрация образовавшегося фосфора  $N_p$  за время облучения  $t$  в потоке медленных нейтронов  $F$

$$N_p = N_0 \langle \sigma_{n,\gamma} \rangle Ft, \quad (1)$$

где  $N_0$  - концентрация ядер изотопа  $^{30}\text{Si}$ ;  $N_0 = 1,56 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ .  
 $\langle \sigma_{n,\gamma} \rangle$  - сечение поглощения  $^{30}\text{Si}$ , усредненное по спектру нейтронов. В частности, для максвелловского распределения с температурой  $T$

$$\langle \sigma_{n,\gamma} \rangle = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{T_0}{T}} \sigma_{n,\gamma},$$

где  $\sigma_{n,\gamma} = 0,107$  барн;  $T_0 = 293$  К.

Значение  $N_p$  связано с удельным сопротивлением отожженного после облучения слитка  $\rho$  соотношением

$$\rho = [e\mu(N_p \pm n_0)]^{-1}, \quad (2)$$

где  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  К - заряд электрона;  $\mu = 1,5 \cdot 10^3 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$  - его подвижность;  $n_0$  - исходная концентрация примеси, которую нужно брать со знаком "+" для проводимости  $n$ -типа и со знаком "-" для проводимости  $p$ -типа.

Вводя обозначение для начального удельного сопротивления слитка  $\rho_0 = (e\mu n_0)^{-1}$ , из формул (1) и (2) для случая проводника  $n$ -типа имеем

$$Ft = \frac{1 - \rho/\rho_0}{N_0 \langle \sigma_{n,\gamma} \rangle e\mu\rho}. \quad (3)$$

При облучении слитка в линейно спадающем потоке тепловых нейтронов до получения заданного удельного сопротивления  $\rho$  времена облучения в начальном положении  $t_1$  и после переворота на  $180^\circ$   $t_2$ , определяются из следующих соотношений

$$\begin{aligned} F_1 t_1 + F_2 t_2 &= \frac{1 - \rho/\rho_1}{N_0 \langle \sigma_{n,\gamma} \rangle e\mu\rho}, \\ F_2 t_1 + F_1 t_2 &= \frac{1 - \rho/\rho_2}{N_0 \langle \sigma_{n,\gamma} \rangle e\mu\rho}. \end{aligned} \quad (4)$$

где  $F_1$  и  $F_2$  - значения теплового потока на переднем и заднем торцах слитка;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  - начальные удельные сопротивления верхнего и нижнего торцов слитка.

Таблица  
Спектр нейтронов в пустом канале N3  
(вблизи поверхности штатного замедлителя)

номер группы	$E_{группы}$ МэВ	Плотность потока нейтронов в группе, $\times 10^{12}$ н/см <sup>2</sup> с при 2 МВт	
		расчет	эксперимент
1	6.5	0.032	0.013
2	4.0	0.15	0.09
3	2.5	0.19	0.15
4	1.4	0.41	0.49
5	0.8	0.30	0.33
6	0.4	0.47	0.58
7	$0.2 \times 10^{-3}$	3.9	7.0

### Литература

- [1] Смирнов Л.С., Соловьев С.П. и др. Легирование полупроводников методом ядерных реакций. Новосибирск, "Наука", 1981г.
- [2] Рогов А.Д., Шабалин Е.П. Сообщение ОИЯИ Р13-9990, Дубна, 1976г.
- [3] Злоказов В.Б. Сообщение ОИЯИ Р10-86-618, Дубна, 1986г.

Рукопись поступила в издательский отдел  
30 марта 1994 года.