

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТРАНСМУТАЦИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ КРЕМНИЯ НА РЕАКТОРЕ ВВР-К

Н.К. Романова¹⁾, Ш.Х. Гизатулин¹⁾, А.Л. Мартюшов¹⁾, Д.А. Накипов¹⁾, П.В. Чакров¹⁾,
N. Takemoto²⁾, N. Kimura²⁾, T. Saito²⁾, K. Tsuchiya²⁾

¹⁾РГП «Институт ядерной физики» Министерства энергетики Республики Казахстан,
ул. Ибрагимова, 1, Алматы, 050032

²⁾Neutron Irradiation and Testing Reactor Center Oarai Research and Development Center Japan
Atomic Energy Agency (JAEA) Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

Представлены результаты совместных работ JAEA (Япония) и ИЯФ (Республика Казахстан) по исследованию технологии трансмутационного легирования кремния на реакторе ВВР-К. Ранее исследования характеристик поля нейтронов методом нейтронно-активационного анализа показали, что для получения нейтронно-легированного кремния с удельным сопротивлением ~400 Ом·см потребуется ~4.4 часа облучения при значении плотности потока тепловых нейтронов $\sim 2.8 \times 10^{12}$ нейтр.·см⁻²·сек⁻¹ в центре канала \varnothing 200 мм.

Введение

Спрос на кристаллы большого диаметра нейтронно-легированного кремния постоянно растёт. Институт ядерной физики в г. Алматы (ИЯФ) эксплуатирует исследовательский водо-водяной реактор ВВР-К на тепловых нейтронах с тепловой мощностью 6 МВт. На реакторе ВВР-К имеется технологическая возможность реализации трансмутационных технологий в каналах большого диаметра: облучательные вертикальные каналы диаметром 100 и 200 мм в боковом водяном отражателе реактора; касательный горизонтальный канал диаметром 190 мм; и ниша тепловой колонны диаметром 1000 мм (рис. 1).

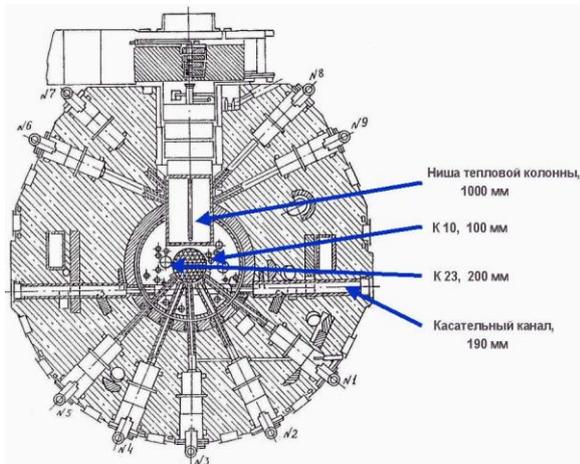


Рис. 1. Каналы большого диаметра на реакторе ВВР-К.

Для исследования возможности трансмутационного легирования кремния был выбран канал №23 (\varnothing 200 мм). Ранее в этом канале были проведены исследования поля нейтронов [1] с помощью имитаторов кремниевых кристаллов. На данный момент в этом канале облучены два кремниевых слитка \varnothing 151 мм.

Нейтронно-физические условия облучения кремниевых кристаллов

Были облучены два кремниевых кристалла: №1 (\varnothing 151мм × 202 мм) и №2 (\varnothing 151мм × 278 мм), доставленные на реактор ВВР-К в рамках кооперации между ИЯФ и Агентством по атомной

энергии Японии (JAEA) по программе «Отработка технологии нейтронного легирования кремния» (Irradiation Technology for NTD-Si) [2].



Рис. 2. Кристаллы кремния.

На момент проведения облучения кремния геометрия активной зоны реактора была такой же, как и при проведении предварительных экспериментов по определению характеристик поля нейтронов в облучательном канале №23 [1]. Экспериментально полученные активационным методом, с использованием флюенс мониторов, характеристики поля нейтронов позволили выбрать оптимальные параметры облучения кремния, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры облучения.

№	Скорость вращения, об./мин	Флюенс, нейтр·см ⁻²	Время облучения, ч
1	2	4×10^{16}	4
2	2	4×10^{16}	4

В обоих случаях центр кристалла находился на 13 мм выше центра активной зоны [1]. Радиальная однородность легирования обеспечивалась за счёт вращения кремния в канале с постоянной скоростью в течение всего времени облучения.

Результаты облучения кремниевых кристаллов

После проведения облучения, отстоя и проведения дезактивационных мероприятий, оба кристалла отправлены в Японию для исследований удельного сопротивления. Кристаллы были подвергнуты отжигу и разрезаны на диски с шагом 50

мм по высоте кристаллов (рис. 3), после чего были измерены значения удельного сопротивления каждого образца четырёхзондовым методом.

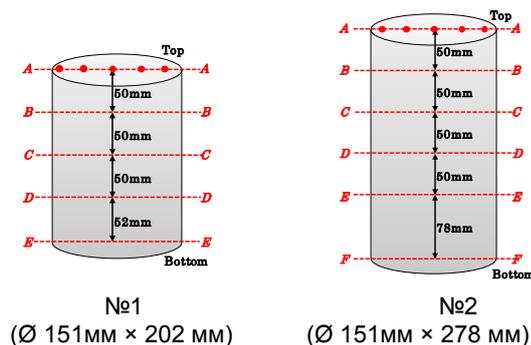


Рис. 3. Схема разрезки кристаллов кремния.

Результаты измерений (в осевом направлении) удельного сопротивления кристаллов представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2. Значения удельного сопротивления для кристалла №1.

Точки измерения	Ω , Ом×см
A – A	448.3
B – B	429.3
C – C	424.6
D – D	425.3
E – E	431.0

Таблица 3. Значения удельного сопротивления для кристалла №2.

Точки измерения	Ω , Ом×см
A – A	425.1
B – B	415.5
C – C	387.3
D – D	379.7
E – E	378.3
F – F	382.7

Аксиальная неравномерность ARV (Axial resistivity variation) [3] была оценена следующим образом:

$$ARV = \frac{\rho_{\max} - \rho_{\min}}{\rho_{\min}} \times 100\%$$

где ρ_{\max} - максимальное значение удельного сопротивления (Ом×см);

ρ_{\min} - минимальное значение удельного сопротивления (Ом×см).

ARV для кристалла №1 составила 5.6%, а для кристалла №2 - 12.4%

По результатам исследований признано, что для кремния №1 был получен хороший уровень осевой неравномерности. Для кремния №2 недостаточный уровень осевой неравномерности, который может быть объяснен аксиальной неравномерностью плотности потока нейтронов в реакторе.

Заключение

Проведённые исследования по отработке технологии трансмутационного легирования кремния показали, что на реакторе ВВР-К возможно выполнять трансмутационное легирование кремния в коммерческих целях. Качество легированного на реакторе ВВР-К кремния (радиальная и осевая неравномерность) может быть значительно улучшены за счёт изменения технологии облучения.

Список литературы

1. Романова Н.К., Takemoto N. Определение флюенса нейтронов с использованием флюенс мониторов при облучениях в облучательном канале ВВР-К. Материалы 10-й Международной конференции (IRS-2013). Минск, Республика Беларусь, 24-27 сентября 2013 г. С. 371-373
2. H. Kawamura, et al. Status of International Cooperation in Nuclear Technology on Testing // Research Reactors between JAEA and INP-NNC, JAEA-Review. 2011-042 (2011).
3. International Atomic Energy Agency, Neutron Transmutation Doping of Silicon at Research Reactors, IAEA-TECDOC-1681 (2012).

INVESTIGATION OF POSSIBILITY TO PRODUCE NEUTRON TRANSMUTATION DOPING SILICON AT THE WWR-K REACTOR

N. Romanova¹, Sh. Gizatuln¹, A. Martyshev¹, D. Nakipov¹, P. Chakrov¹,
N. Takemoto², N. Kimura², T. Saito², K. Tsuchiya²

¹INP RK, Almaty, Ibragimova str.1, Republic of Kazakhstan, info@inp.kz

²JAEA, Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken, Japan, ird-support@jaea.go.jp

Irradiation test of silicon ingot was planned using WWR-K in Institute of Nuclear Physics (INP), Republic of Kazakhstan by Japan Atomic Energy Agency (JAEA) and INP. It is possible to irradiate the silicon ingot of 6 inch in diameter at the irradiation channel (\varnothing 200 mm) in the WWR-K. Before the irradiation test, the fabricated Si rotating device was established on the WWR-K, and a preliminary irradiation test using aluminum ingots was carried out to evaluate the irradiation field and to determine the test condition for the silicon ingot. Based on the result, the irradiation test of two silicon ingots was carried out, and the resistivity of each irradiated one was measured to investigate the possibility to produce neutron transmutation doping silicon in research reactors such as the WWR-K and the JMTR.