

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ НЕЙТРОННО-ТРАНСМУТАЦИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ КРЕМНИЯ ДИАМЕТРОМ 204 ММ НА РЕАКТОРЕ ИРТ-Т

И.И. Лебедев, В.А. Варлачев, Н.В. Смольников,
А.Г. Наймушин, М.Н. Аникин, А.Е. Овсенёв,
*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
пр. Ленина 30, Томск 634050, Россия, iil@tpu.ru*

Работа посвящена разработке и внедрению технологии нейтронно-трансмутационного легирования (НТЛ) монокристаллов кремния диаметром 204 мм на исследовательском реакторе ИРТ-Т Томского политехнического университета. Впервые обоснована возможность проведения высокоравномерного легирования без реконструкции корпуса реактора за счет использования графитового замедлителя, гафниевого фильтра тепловых нейтронов и оптимизации конфигурации активной зоны. Создан цифровой двойник реактора, обеспечивающий точное моделирование нейтронного поля и распределения фосфора в объеме кристалла. Проведенные расчеты и эксперименты подтвердили достижение однородности легирования >95 % и соответствие требованиям по радиационной безопасности. Разработана технологическая линия, обеспечивающая производительность свыше 5 тонн кремния в год. Полученные результаты открывают перспективы производства базового материала для силовой электроники и расширяют производственные возможности реактора ИРТ-Т.

Ключевые слова: НТЛ-кремний; бассейновый реактор; графитовый замедлитель; гафниевый фильтр; нейтронное поле; равномерность легирования; цифровой двойник; ИРТ-Т; силовая электроника.

DEVELOPMENT OF NEUTRON TRANSMUTATION DOPING TECHNOLOGY FOR 204 MM SILICON ON THE IRT-T REACTOR

I.I. Lebedev, V.A. Varlachev, N.V. Smolnikov,
A.G. Naimushin, M.N. Anikin, A.E. Ovsenev
*National Research Tomsk Polytechnic University,
30 Lenin Ave., 634050 Tomsk, Russia*

This study presents the development and implementation of a neutron transmutation doping (NTD) technology for monocrystalline silicon ingots with a diameter of 204 mm at the IRT-T research reactor of Tomsk Polytechnic University. The increasing demand for high-power semiconductor devices necessitates ultrapure and uniformly doped silicon, which traditional doping methods fail to provide at large diameters. Unlike expensive foreign reactor facilities, this work demonstrates a cost-effective approach using a pool-type reactor without major structural modifications. A novel vertical experimental channel (VEC-K) was designed and installed within the reactor's graphite moderator zone. A digital twin of the reactor-channel-silicon system was developed in MCU-PTR Monte Carlo code, enabling accurate prediction of neutron flux distribution and phosphorus concentration profiles inside the ingot. A hafnium thermal neutron filter with a sectoral geometry was introduced to optimize the axial uniformity of doping. Numerical modeling and experimental validation via neutron activation dosimetry and electrical resistivity measurements confirmed a doping uniformity exceeding 95%, with an overall phosphorus distribution variation below 4%.

This work offers a technically and economically viable solution for domestic NTD-Si production, restoring Russia's competitive edge in power electronics and expanding the IRT-T reactor's capabilities for solid-state physics applications.

Keywords: NTD silicon; pool-type reactor; graphite moderator; hafnium filter; neutron field; doping uniformity; digital twin; IRT-T; power electronics.

Введение

Нарастающая потребность в мощных полупроводниковых приборах для преобразователей электроэнергии, транспортных установок и «зеленой» генерации

предопределяет спрос на монокристаллический кремний большого диаметра с исключительно равномерными электрофизическими параметрами. Классические плазменные и ионно-имплантационные ме-

тоды не обеспечивают требуемого градиента примесей; потому за рубежом (FRM-II, OPAL, BR2, HANARO) повсеместно применяется нейтронно-трансмутационное легирование (НТЛ) [1-5]. В России же до недавнего времени отсутствовали установки для слитков >150 мм, что сдерживало развитие силовой электроники. Настоящая работа ставит целью научно обосновать и реализовать технологию НТЛ-Si Ø 204 мм на действующем исследовательском реакторе ИРТ-Т ТПУ, не прибегая к капитальной реконструкции корпуса реактора, и тем самым вернуть российской отрасли конкурентоспособность.

Материалы и методы исследования

Объект исследования — вертикальный экспериментальный канал (ВЭК-К) нового типа, размещенный во внутрибаковом пространстве ИРТ-Т в зоне графитового замедлителя. Ключевые задачи:

- Создание цифрового двойника реактора/канала в коде MCU-PTR; верификация по натурным измерениям (ошибка $\leq 5\%$).

- Оптимизация геометрии канала, фильтра тепловых нейтронов и режима работы СУЗ для выравнивания поля.

- Экспериментальное подтверждение радиальной и аксиальной однородности легирования >95 %.

- Оценка ядерной и радиационной безопасности, а также теплогидравлических параметров.

Расчеты велись статистическим методом Монте-Карло с библиотекой MDBPT50; в модели учтены спектральные эффекты, самоэкранирование, реальное выгорание ТВС и «отравление» бериллиевого отражателя.

Результаты и их обсуждение

ВЭК-К диаметром 250 мм монтируется на штатные рельсы демонтированного генератора активности, смещаясь на 120 мм от боковой стенки активной зоны. Замедлитель — призма из графита ГР-280: этот

материал минимизирует поглощение, дешев и технологичен. Внешний вид установки представлен на рис. 1.

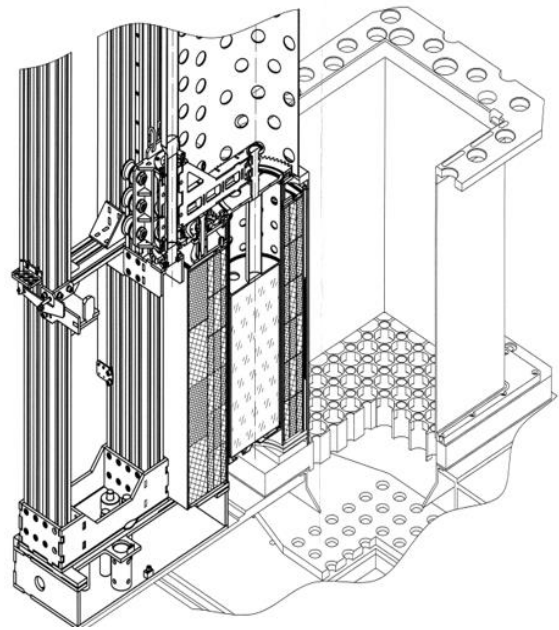


Рис. 1. Общий вид новой установки для легирования кремния

Для коррекции аксиального профиля предложен коаксиальный полуцилиндр толщиной 1.5 мм из гафния, собранный из лент без зазоров. Он уменьшает коэффициент аксиальной неравномерности K_z до 1.07 ($\pm 1\%$). Однако из-за технологических ограничений было принято решение использовать более традиционную конструкцию фильтра: щелевой фильтр в виде полосок разной ширины. Эскиз фильтра представлен на рис. 2.

Реальные значения неравномерности с учетом положений стержней регулирования были экспериментально определены для компаний 104-108 и составили менее 5 %.

Слиток $\varnothing 203 \times 500$ мм вращается с частотой 5 об/мин, но не сканируется по высоте, что упрощает механику и снижает погрешность дозы.

С перераспределением «свежих» ТВС поток через грань замедлителя увеличен на 30 %, а частичная замена «отравленного» бериллия прибавляет еще 13.7 % теплового потока в области облучения.

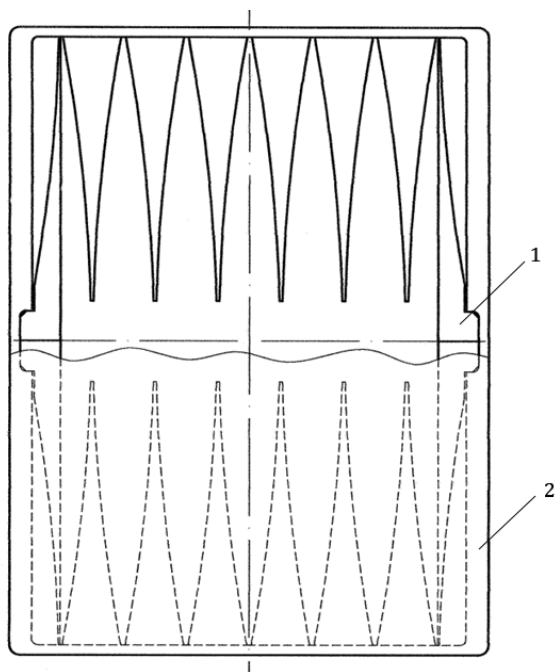


Рис. 2. Конструкция фильтра, предложенная головным конструктором: 1 – полоски из металлического гафния, 2 – алюминиевая оболочка кассеты фильтра

Заключение

Разработанные физико-технологические решения обеспечивают промышленное НТЛ монокристаллов кремния $\varnothing 204$ мм с рекордной для бассейновых реакторов равномерностью $<4\%$ и годовой производительностью >5 т. Это открывает перспективы формирования отечественной линейки IGBT- и IGBT-приборов на базовом сырье российского происхождения, а также расширяет исследовательский потенциал реактора ИРТ-Т для задач физики твердого тела (активационный анализ, радиационное материаловедение).

Впервые обоснована возможность формирования заданного аксиального профиля нейтронного потока в бассейновом

реакторе малой мощности методом щелевого гафниевого фильтра.

Разработан цифровой двойник «реактор + канал + слиток» с учетом спектральной селекции внутри кристалла, позволяющий напрямую предсказывать распределение фосфора и радиационных дефектов.

Экспериментально доказана возможность НТЛ-Si $\varnothing 204$ мм без изменения геометрии корпуса реактора.

Библиографические ссылки

1. Shchurovskaya M.V., Alferov V.P., Geraskin N.I., Radaev A.I., Naymushin A.G., Chertkov Yu.B., etc Control rod calibration simulation using Monte Carlo code for the IRT-type research reactor. *Annals of Nuclear Energy* 2016; 96: 332–343.
2. Аникин М.Н., Лебедев И.И., Смольников Н.В., Наймушин А.Г., Варлачев В.А. Проблемы облучения монокристаллического кремния большого диаметра. В кн.: Углов В.В., гл. ред. Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 13-й Междунар. конф. (30 сент. – 3 окт. 2019 г., Минск). Минск: БГУ; 2019. С. 37–39.
3. Varlachev V.A., Kuzin A.N., Lykhin S.V., Solodovnikov E.S., Usov Yu.P., Fotin A.V., Tsibul'nikov Yu.A. Tomsk complex for neutron-transmutation doping of silicon. *Atomic Energy* 1995; 79: 447–449.
4. Смольников Н.В., Лебедев И.И. Расчет энерговыделения в слитках кремния на реакторе ИРТ-Т В сборнике: Актуальные проблемы инновационного развития ядерных технологий научная сессия НИЯУ МИФИ, материалы конференции. под редакцией М.Д. Носкова. 2018; 139.
5. Смольников Н.В., Лебедев И.И., Аникин М.Н. Исследование влияния высокотеплопроводящих сплавов на равномерность распределения легирующей примеси при нейтронно-трансмутационном легировании кремния в вертикальном экспериментальном канале реактора ИРТ-Т. Изотопы: технологии, материалы и применение: материалы V Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Томск, 19-23 ноября 2018 г. Томск: Графика, 2018; 97.