

К ВОПРОСУ О МОДЕРНИЗАЦИИ КОМПЛЕКСА НЕЙТРОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ КРЕМНИЯ НА ИРТ-Т

Т.Х. Бадретдинов, А.Г. Горюнов, В.А. Варлачев

Томский политехнический университет, г. Томск



Представлен модернизированный электропривод автоматизированного комплекса нейтронного легирования кремния на исследовательском ядерном реакторе ИРТ-Т Томского политехнического университета. Безредукторный комплектный тихоходный электропривод обеспечивает необходимую надежность и увеличенный ресурс безаварийной работы, удобство контроля, управления и обслуживания, отвечает современным требованиям эргономики, является массовым изделием и обладает приемлемой стоимостью. Проведены лабораторные испытания. Рекомендован для использования.

Ключевые слова: комплекс нейтронно-трансмутационного легирования кремния, комплектный безредукторный электропривод.

Key words: complex neutron transmutation doping of silicon, a complete gearless electric drive.

В последние десятилетия производство электронных средств, в особенности микросхем и микропроцессоров, переживает бурный подъем. Улучшаются их основные технические характеристики – быстродействие и энергопотребление, которые напрямую зависят от исходной чистоты и параметров легирования полупроводникового материала (его чистоты и равномерности легирования).

Благодаря своим уникальным свойствам, неограниченным природным запасам исходного сырья кремний является наиболее применяемым и дешевым материалом для изготовления различных полупроводниковых приборов, которые играют важнейшую роль во всех областях электроники, электротехники и связи.

В исходном виде природный кремний не может применяться, его необходимо подвергнуть технологическому циклу производства. Основной операцией технологического цикла производства полупроводникового кремния, во многом определяющей его электрофизические параметры, является легирование.

Целью легирования кремния является получение полупроводникового материала с заданными параметрами, такими как [1]

- удельное электрическое сопротивление (УЭС);
- равномерное распределение легирующей примеси как аксиальное, так и радиальное;
- минимальное отклонение от заданных параметров – точность легирования.

Метод нейтронно-трансмутационного легирования (НТЛ) кремния основан на облучении слитков кремния потоком тепловых нейтронов. При этом в кремнии

образуются атомы легирующей примеси по реакции $^{30}\text{Si}(n, \gamma)^{31}\text{Si} \xrightarrow{\beta} ^{31}\text{P}$ [2]. Большие потенциальные возможности делают его единственным методом получения легированного кремния для тех областей полупроводниковой техники, где требуется кремний с высокой однородностью распределения УЭС и малым отклонением УЭС от заданного номинала. К их числу относятся силовая полупроводниковая техника, производство приборов с зарядовой связью, производство полупроводниковых детекторов излучений, например, датчики ИК-излучения и т.д. [3,4].

Обычно в технологии НТЛ кремния предъявляют жесткие требования к неравномерности легирования – 3–5% или менее. При облучении распределение ядер ^{31}P следует за распределением флюенса тепловых нейтронов по объему слитков кремния. Поэтому если контейнер с кремнием неподвижен относительно зоны облучения (статический режим), то его длина, на которой достигается указанная неравномерность легирования, в несколько раз (или даже в десятки раз) меньше соответствующего линейного размера активной зоны, что затрудняет применение этого режима облучения на исследовательских реакторах. На промышленных реакторах, имеющих большие размеры активной зоны (несколько метров), можно в статическом режиме облучать контейнеры с кремнием длиной 0,5 м и более. В связи с этим на исследовательских реакторах в процессе облучения протяженные контейнеры так или иначе перемещают вдоль канала реактора и вращают вокруг их оси для достижения необходимой равномерности легирования [5].

Технология НТЛ кремния была реализована на исследовательском ядерном реакторе Научно-исследовательского института ядерной физики при Томском политехническом институте в 1984 г. [5]. Для облучения кремния был выбран горизонтальный экспериментальный канал ГЭК-4 диаметром 150 мм. По отношению к активной зоне канал является касательным и проходит сквозь бериллиевый отражатель, примыкающий к активной зоне реактора (рис. 1). Расстояние между осью канала и активной зоной – 262 мм. Размеры активной зоны (без учета отражателя) – 429×286×580 (мм). Размеры бериллиевого отражателя со стороны канала – 572(вдоль канала)×648×660 (мм). При облучении контейнеры со слитками возвратно-поступательно перемещаются по каналу относительно точки с максимальной плотностью потока тепловых нейтронов. Амплитуда такого перемещения – 1660 мм, скорость – 270 мм/мин. Одновременно с перемещением контейнер вращается со скоростью 3 об/мин.

Механическая часть устройства облучения содержит скамейку 1, по которой движется труба-пробка 3 с облучателем и двумя контейнерами 2; привод перемещения 4 трубы-пробки; привод вращения 5 контейнеров; транспортный путь 6 с тележкой 8 для перемещения контейнеров к месту упаковки-распаковки; перегрузочное устройство 7 для подачи контейнеров с облучателя на тележку и обратно. Все это окружено биологической защитой 13 из тяжелого бетона, примыкающей к корпусу реактора.

Система детектирования тепловых нейтронов включает в себя семь камер

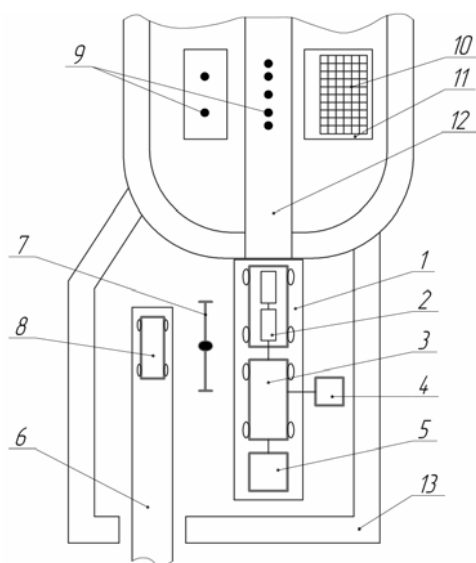


Рис. 1. Комплекс НТЛ кремния

деления типа КТВ-4, разработанных и изготовленных в Научно-исследовательском конструкторском институте энерготехники. 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 калиброваны на показание средней плотности потока тепловых нейтронов по всей зоне облучения слитков кремния.

Нейтронное поле в канале ГЭК-4 аттестовано Всесоюзным научно-исследовательским институтом физико-технических и радиационных измерений. Доля тепловых нейтронов в спектре составляет 73 %, спектральный коэффициент (отношение плотности потока тепловых нейтронов к интегральной плотности потока нейтронов с энергией свыше 3 МэВ) – 106, эффективная температура тепловых нейтронов – 337°K, максимальная плотность потока тепловых нейтронов в пустом канале – $1,1 \cdot 10^{13} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Электронная и электрическая части автоматизированного комплекса НТЛ кремния предназначены для контроля над состоянием комплекса и управления исполнительными механизмами механических устройств. В качестве исполнительных механизмов используются шесть электромеханических приводов, которые состоят из преобразователя электропривода и синхронного электродвигателя типа ДСТ 114-0,18[6]. Каждый двигатель скомплектован с волновым редуктором, т.к. в рабочих режимах облучения, транспортировки, перегрузки используются реверсивные скорости вращения на валу редуктора от 0,1 до 3 оборотов/мин, причем должна обеспечиваться достаточно высокая стабильность скорости вращения с разбросом менее 10% от требуемой скорости вращения. Применение волновых редукторов было обусловлено также и ограничением геометрических размеров установочных мест электродвигателя и редуктора.

Длительность процесса облучения рабочего режима комплекса НТЛ кремния может достигать 100 часов для достижения заданных параметров легирования, и если учитывать время на транспортировку, перезагрузку контейнеров с облучаемым материалом, то можно говорить о фактически непрерывном режиме работы исполнительных механизмов. Как показала эксплуатация комплекса НТЛ кремния, самым ненадежным звеном комплекса являются редукторы, а среди них наиболее часто подвержены поломкам редукторы, исполняющие в процессе облучения возвратно-поступательное и вращательное движения контейнеров с упакованными в них слитками кремния. Последствия таких поломок очевидны, т.к. контейнер с облучаемым материалом в это время находится в горизонтальном канале ядерного реактора. Надо добавить, что сами по себе редукторы являются достаточно уникальными изделиями, изготовленными в штучном количестве экземпляров, восстановление их представляет значительную техническую проблему. Замена их на технически аналогичные изделия представляет в дополнение ко всему и экономическую проблему, т.к. стоимость таких изделий достаточно высока. Аналитический обзор рынка предлагаемых электромеханических приводов показал, что наиболее экономически выгодным и логичным является применение безредукторного электропривода, адаптированного для приведения в движение механических устройств комплекса НТЛ кремния и сочетающего в себе комплектный электропривод с развитым интерфейсом пользователя.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

- выбор гибридного электродвигателя и системы управления, обеспечивающие необходимые параметры;
- выбор схмотехнических решений электропривода, обеспечивающих его адаптацию к применению в комплексе НТЛ кремния;

- изготовление макета комплектного электропривода и проведение испытаний.

Первые две задачи были решены выбором представленного в работе [7] комплектного тихоходного электропривода, предназначенного для обеспечения различных параметров вращения, задаваемых оператором комплекса НТЛ кремния. Было решено наиболее целесообразным применить в данной разработке бесконтактный двигатель постоянного тока, что обуславливает наличие определенной структурной схемы электропривода, состоящей из двигателя, датчика положения ротора, блока обработки сигнала обратной связи, инвертора напряжения. Данная система имеет ряд изменяемых параметров работы в процессе эксплуатации, что предполагает наличие интерфейса пользователя, состоящего из индикаторного табло и клавиатуры ввода данных [7].

На основе вышесказанного можно определить структурные единицы электропривода: источник вторичного электропитания, система управления электроприводом, инвертор напряжения, датчик положения, блок обратной связи, интерфейс пользователя. Структурная схема представлена на рис. 2 [7].

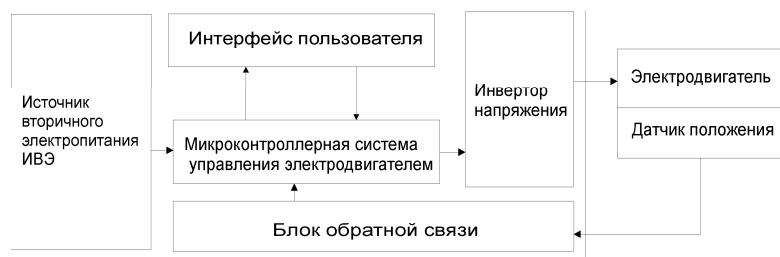


Рис. 2. Структурная схема комплектного безредукторного электропривода.

В данном электроприводе необходимо обеспечивать стабильность скорости вращения на уровне $\pm 10\%$, поэтому в систему вводится обратная связь по скорости вращения, являющейся производной по углу поворота.

В качестве первичного преобразователя применен аналоговый датчик угла поворота на основе оптического датчика, состоящий из интегрального инкрементного энкодера и кодового диска.

Сигнальные провода от датчиков угла поворота ротора двигателя до блока управления расположены в едином кабеле с силовыми проводами, они защищены экраном, соединенным с землей, но для полного исключения помех необходима установка входных фильтров нижних частот перед попаданием сигнала обратной связи в блок обратной связи.

Важнейшей частью системы управления электродвигателем является инвертор напряжения для преобразования постоянного напряжения силового канала ИВЭ в переменное напряжение заданной формы для питания электродвигателя.

Электропривод выполнен в двух отдельных блоках (электродвигатель и датчики положения ротора и температуры обмоток, микропроцессорная система управления электродвигателем), соединенных кабелем. В электроприводе реализован интерфейс RS-485. Предполагается, что физическое соединение между компьютером и электроприводом осуществляется через преобразователь RS-232/RS-485 или USB/RS-485, с драйверами, позволяющими обращаться к преобразователю как к виртуальному COM-порту. В комплект поставки изделия входит дистанционный пульт управления и контроля, позволяющий настраивать электропривод на конкретные условия применения и управлять устройством в автоматическом режиме.

Рекомендуемый для применения в составе комплекса НТЛ кремния на ГЭК-4 исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т комплектный безредукторный электропривод предварительно был экспериментально исследован в лабораторных условиях. Была выполнена проверка линейности характеристики $N = f(N_3)$, где N – частота вращения выходного вала электропривода, N_3 – заданная частота вращения выходного вала электропривода. Экспериментально установлено, что нелинейность характеристики не превышает 0,01% в диапазоне изменения момента нагрузки от 0 до 19 Н·м.

Комплектный электропривод отвечает современным требованиям эргономики. Его внедрение позволяет уменьшить шум и уменьшить совокупное время и частоту сервисного обслуживания оборудования, при увеличении срока службы. По сравнению с заменяемыми агрегатами вращения у разработанного электропривода значительно увеличится ресурс работы, который фактически определяется только ресурсом подшипников двигателя.

Литература

1. Таиров Ю.М., Цветков В.Ф. Технология полупроводниковых и диэлектрических материалов. – СПб.: Лань, 2002. – 423 с.
2. Нейтронное трансмутационное легирование полупроводников/Под ред. Дж. Миза. – М.: Мир, 1982. – 264 с.
3. Смирнов Л.С., Соловьев С.П., Стась В.Ф., Харченко В.А. Легирование полупроводников методом ядерных реакций. – Новосибирск: Наука, 1981. – 181 с.
4. Хобгуд Х., Брэггинз Т., Сварц Дж., Томас Р. Значение нейтронного трансмутационного легирования кремния в разработке материала для высокочувствительных ИК-приемников//Нейтронное трансмутационное легирование полупроводников/Под ред. Дж. Миза. – М.: Мир, 1982. – С. 217-238.
5. Варлачев В.А., Солодовников Е.С. Комплекс нейтронного легирования кремния на ИРТ-Т. Опыт эксплуатации/Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Исследовательские реакторы в XXI веке». – М.: 2006. – С. 110.
6. Бесконтактный электропривод ПРБ-1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации 935.84.027.000ТО. – Томск: 1986. – 90 с.
7. Калиниченко Е.П. Подготовка к производству комплектного безредукторного тихоходного электропривода (КБЭ)/ Научно-технический отчет о выполнении проекта. – Томск: 2005. – 25 с.

Поступила в редакцию 25.10.2009

УДК 621.039.54

Conditioning of not Tight Spent Nuclear Fuel with use of Magnum-Phosphate Compound \V.J. Suhonosov, A.N. Nikolaev, S.A. Nikolaev, I.E. Somov, O.V. Suhoverhova, V.A. Chernov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 6 pages, 4 illustrations. – References, 7 titles.

For conditioning of not tight spent nuclear fuel it is offered to use magnum-phosphate substantiation. It is experimentally shown that the initial material has high fluidity which remains within not less hour. It will allow to carry out reliably pouring of intertrumpet space of not tight spent nuclear fuel. At hardening of materials it is formed compound with density of 1,5–1,8/cm³. The material possesses functions of a protective barrier: it is not dissolved in the water; entered radionuclides strontium and cesium are strongly fixed in material structure.

УДК 621.039.5: 681.587.72

Updating of Set Neutron Silicon Doping using IRT-T \T.H. Badretdinov, A.G. Goryunov, V.A. Varlachev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 5 pages, 2 illustrations. – References, 7 titles.

Updated electric drive of the automated complex of neutron silicon doping using research nuclear reactor IRT-T of Tomsk Polytechnic University is introduced. Gearless complete low-speed electric drive provides the necessary reliability and extended trouble free operation service life, ease of control, management and maintenance, meets the modern requirements of ergonomics. It is a mass product and has acceptable price. The laboratory tests were carried out. Recommended for use.

НАШИ АВТОРЫ

Амосов П.В. – к.т.н., с.н.с. Горного института КНЦ РАН, доцент кафедры теплофизики Кольского филиала Петрозаводского государственного университета. E-mail: vosoma@goi.kolasc.net.ru.

Амосов С.В. – ведущий инженер лаборатории стендовых исследований топлива ядерных реакторов ОАО «ГНЦ НИИАР».

Анисонян В.Р. – в 2005 г. окончил Государственный инженерный университет Армении (бывший Ереванский политехнический институт) по специальности «Эксплуатация АЭС». В 2009 г. окончил очную аспирантуру ИАТЭ. В настоящее время работает в ЭНИМЦ «Моделирующие системы». Область научных интересов – расчеты с использованием CFD-кода OpenFOAM в рамках проекта специализированного медицинского реактора MAPC.

Анишев Е.Ю. – к.т.н., главный специалист ОАО «ОКБМ Африкантов». Тел. (831) 246-96-41.

Баранов Ю.Д. – начальник лаборатории ГНЦ РФ-Физико-энергетического института им. А.И. Лейпунского (ГНЦ РФ-ФЭИ). Тел. (48439)9-82-66.

Башкиров Н.И. – заведующий лабораторией контроля радиоактивного загрязнения окружающей среды ГУ «Томский ЦГМС». Тел. (3822)53-21-29.

Валетова Н.К. – старший научный сотрудник ГУ НПО «Тайфун». Тел. (48439)7-18-05.

Витушкина Н.М. – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник ГНЦ РФ-ФЭИ. E-mail: vita_nm@mail.ru.

Глебов А.П. – к.т.н., ведущий научный сотрудник ГНЦ РФ-ФЭИ. Тел. (48439)9-88-69.

Горбунов В.С. – к.т.н., ведущий инженер-конструктор ОАО «ОКБМ Африкантов». Тел. (831) 246-94-40.

Грицюк С.В. – аспирант Обнинского института атомной энергетики НИЯУ МИФИ (ИАТЭ НИЯУ МИФИ). Закончил факультет кибернетики ИАТЭ в 2007 г., участник нескольких международных проектов по созданию систем поддержки принятия решений. Область научных интересов – распределенные системы, многокритериальный анализ решений, разработка и применение систем поддержки принятия решений, Java-технологии.

Диденко В.И. – заведующий лабораторией ИТ ИАТЭ НИЯУ МИФИ. Закончил факультет кибернетики ИАТЭ в 1998 г. Участник нескольких международных проектов по разработке систем поддержки принятия решений и анализу рисков. Область научных интересов – распределенные системы, разработка и применение ГИС поддержки принятия решений, анализ рисков, Java-технологии.

Дунаев Г.Е. – научный сотрудник ГУ НПО «Тайфун».

Зайцев А.А. – к.т.н., начальник лаборатории ГНЦ РФ-ФЭИ. E-mail: aluk@ippe.ru.

Кабанов А.И. – помощник главного инженера ГУ НПО «Тайфун» по радиационной безопасности. Тел. (48439)7-17-32.

Казанцев А.А. – к.т.н., доцент ИАТЭ НИЯУ МИФИ, зав. лабораторией теплофизического моделирования в ЭНИМЦ «Моделирующие системы». В 1981 г. окончил Обнинский филиал Московского инженерно-физического института. Область научных интересов – разработка моделей основного технологического оборудования, моделирование двухфазных потоков для тренажеров АЭС, расчеты с использованием CFD-кода OpenFOAM.