

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора

Слепцова Владимира Владимировича

на диссертацию Гикала Бориса Николаевича

«Новое поколение циклотронов тяжелых ионов для прикладных исследований и промышленного применения»,

представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника.

Изучение фундаментальных физических процессов взаимодействия высокоэнергетических частиц с твердым телом является основой их широкого практического использования.

В физике тяжелых ионов сформировалось перспективное направление научно-прикладных исследований, в основе которого лежит изучение воздействия ускоренных тяжелых ионов на твердое тело.

Успехи Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ в области прикладных исследований с использованием пучков тяжелых ионов хорошо известны в мире.

С помощью пучков тяжелых ионов удастся изменять свойства поверхности материала. Уже сегодня пучки тяжелых ионов широко используются в электронной промышленности для легирования полупроводниковых материалов. Таким путем можно формировать аморфные и диэлектрические слои в полупроводниках с заданной толщиной и глубиной залегания.

Особое место в практике внедрения ядерно-физических методов в промышленных процессах занимает технология производства трековых мембран с использованием ускоренных тяжелых ионов, которая впервые была реализована в середине 1970-х годов на циклотроне У-300 ЛЯР. Метод получения трековых мембран с использованием тяжелых ионов показал большую перспективность и преимущество перед методом, базирующимся на облучении полимерных пленок осколками деления урана и практически полностью заменил «реакторный» метод облучения.

Внедрение технологий с использованием тяжелых ионов сдерживается, прежде всего, малочисленностью специализированных ускорителей промышленного применения, а также недостаточной изученностью физических процессов, протекающих в твердом теле при обработке их высокоэнергетическими частицами.

В настоящее время особенно актуальна задача создания специализированных промышленных ускорителей тяжелых ионов, обеспечивающих реализацию наукоемких технологий в условиях реального производства. В Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ выполнена целевая программа по разработке специализированных циклотронов тяжелых ионов для производства трековых мембран и прикладных исследований.

Начиная с 1980-х годов в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ ведутся разработки ускорителей для производства трековых мембран и прикладных исследований.

Современные достижения в развитии ионных источников и ускорителей создали предпосылки к разработке нового подхода к проектированию циклотронов тяжелых ионов нового поколения.

Целью диссертационной работы Гикала Б.Н. является разработка физических принципов и технических решений для создания специализированных циклотронов тяжелых ионов нового поколения с использованием системы аксиальной инжекции пучка из внешних источников ионов типа ЭЦР для прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий с использованием пучков ионов с энергией до 2,5 МэВ/нуклон.

В ходе работы разработана концепция системы аксиальной инжекции пучка ионов в циклотрон из внешнего источника, которая была создана на циклотроне У-200.

Выполнен проект глубокой модернизации циклического ускорителя ИЦ-100 путем создания системы аксиальной инжекции пучка из внешнего сверхпроводящего источника ионов. Реконструированы все системы циклотрона в соответствии с новой концепцией, создан специализированный канал и установка для проведения исследований и облучения полимерной пленки с использованием пучков ионов от неона до вольфрама с энергией 1-1,2 МэВ/нуклон.

Разработаны и созданы специализированные циклотроны ДЦ-60 и ДЦ-110 для производства трековых мембран и использования в области нанотехнологий.

Научная новизна диссертации заключается прежде всего в разработке концепции нового поколения специализированных циклотронов тяжелых ионов на энергию до 2,5 МэВ/нуклон с использованием системы аксиальной инжекции пучка из внешних источников ионов типа ЭЦР.

Впервые в отечественных научных центрах и центрах стран-участниц ОИЯИ создана система аксиальной инжекции пучка ионов в циклотрон, которая стала концептуальным решением для разработки подобных систем на циклотронах тяжелых ионов ЛЯР. Выполнен проект глубокой модернизации первого в мире

специализированного циклотрона тяжелых ионов ИЦ-100. Произведен переход от внутреннего источника ионов типа PIG к системе внешней инъекции из ЭЦР источника. Получены пучки ускоренных ионов неона, аргона, железа, криптона, йода, ксенона, вольфрама, которые используются для производства трековых мембран и исследований в области физики твердого тела.

Разработан и создан специализированный циклотронный комплекс тяжелых ионов ДЦ-60 для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий. Комплексный метод для формирования магнитной структуры циклотрона позволил создать магнитную систему многофункционального изохронного циклотрона ДЦ-60, которая обеспечивает плавную вариацию энергии ускоряемых ионов в диапазоне от 0,35 до 1,77 МэВ/нуклон. Циклотрон ДЦ-60 создан для Университета им. Л.Н.Гумилева в Астане. В настоящее время в созданном научном центре ведутся прикладные исследования, обучаются студенты и аспиранты. Налажено серийное облучение полимерной пленки для производства трековых мембран.

Разработан и создан специализированный высокоинтенсивный циклотрон ДЦ-110, на котором получены пучки ускоренных ионов Ar, Kr, Xe с энергией 2,5 МэВ/нуклон и интенсивностью свыше 10 мкА. Ускоритель способен облучать более 2 миллионов квадратных метров полимерной пленки в год для изготовления трековых мембран. ДЦ-110 входит в состав промышленного комплекса «БЕТА», созданного для производства каскадных плазмаферезаторов крови на основе технологии трековых мембран.

Практическая ценность диссертации заключается в создании циклотронных комплексов ИЦ-110, ДЦ-60 и ДЦ-110. Параметры пучков, полученные на ускорителях, полностью подтверждают правильность выбранных автором решений, изложенных в диссертации в разделе «Концепция проектирования циклотронов тяжелых ионов для прикладных задач и промышленного применения».

Главы диссертации 3,4 и 5 посвящены описанию технических решений, примененных при создании циклотронов ИЦ-110, ДЦ-60 и ДЦ-110. В диссертации приводятся принципы оптимизации параметров систем и выбор конструктивных решений на базе глубокого анализа требований, исходящих из математических расчетов и физических принципов, а также возможности их технической реализации. В диссертации приводится большое количество экспериментальных данных, полученных на циклотронах ЛЯР, которые стали не только основой для определения параметров новых циклотронов промышленного применения, но и стали основополагающими принципами развития циклотронной техники нового поколения.

В ходе работы был выполнен большой комплекс экспериментальных исследований свойств циклотронных систем и параметров ускоренных пучков. Результаты, приведенных в диссертации исследований, показали хорошее соответствие проектных и реальных характеристик разработанных ускорителей. Особенно обращает на себя внимание удачное решение задачи группировки пучка в системе аксиальной инжекции циклотрона ДЦ-110, позволившей получить высокий коэффициент захвата ионов в ускорение при высокой интенсивности пучка. Этот раздел диссертации, описывающий систему аксиальной инжекции пучка в циклотрон, целесообразно включить в специализированный учебный курс по ускорителям.

В диссертации приводятся не только принципы построения систем циклотронов, но и способы устранения ошибок, вызванных не точностью производства или отличия свойств материалов, указаны и обоснованы допуски на изготовление узлов ускорителей, что для диссертации такого направления является важным.

Диссертация изложена четко и понятно, хорошо иллюстрирована, в ней содержится 281 рисунок и 66 таблиц, в которых сравниваются проектные и полученные параметры систем циклотронов, что, безусловно, способствует ясности изложения материала.

Научные результаты, изложенные в диссертации, опубликованы в виде препринтов ОИЯИ, в журналах ЖТЭФ, «Nucl. Phys.», «Письма в ЭЧАЯ», «Атомная энергия», ПТЭ, в трудах российских и международных конференций.

В качестве недостатков диссертации следует отметить:

- 1) Встречаются опечатки, повторы текстов и рисунков.
- 2) В диссертации приводятся технические решения и экспериментальные результаты, которые получены на базе серьезных математических расчетов, однако в тексте диссертации приводятся только результаты расчетов и не всегда приводится описание методов математического моделирования, с помощью которых они получены.
- 3) Недостаточно внимания уделено диагностике и методике подготовки пучка в канале для облучения полимерной пленки, не приведены критерии, по которым оптимизируется ускоритель для проведения облучений.

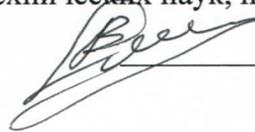
Указанные замечания не снижают общей высокой оценки научного уровня работы и ее результатов.

В целом диссертация Б.Н.Гикала полностью удовлетворяет требованиям ВАК к докторским диссертациям, она вносит существенный вклад в развитие теории и техники циклотронов. Разработана и создана серия ускорителей, которая внедрена в России и за рубежом.

Автореферат отражает содержание диссертационной работы.

Автор диссертации Б.Н.Гикал, несомненно, заслуживает присвоения степени доктора технических наук по специальности 01.04.20 "Физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника".

Доктор технических наук, профессор



В.В.Слепцов

«\_\_»\_\_\_\_\_2014

Подпись В.В. Слепцова заверяю

*Анна* *Т.И. уполномоченный секретарь Антошина Т.Т.*



«\_\_»\_\_\_\_\_2014