

9-2006-63

3456
K-552

На правах рукописи
УДК 621.384.633

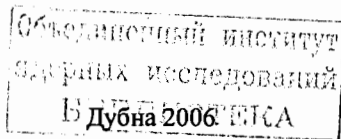
КОБЕЦ
Валерий Васильевич



ЛИНЕЙНЫЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ УСКОРИТЕЛИ
ПРОТОНОВ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА
ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных частиц
и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Работа выполнена в Лаборатории физики частиц Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор,
член-корреспондент РАН

Игорь Николаевич Мешков

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Леонид Владимирович Кравчук

кандидат технических наук

Владимир Афанасьевич Михайлов

Ведущая организация:

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва


Защита диссертации состоится _____ 2006 г. в “_____”
часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.05 в Объединенном
институте ядерных исследований, г.Дубна. Московской области.

Автореферат разослан “_____” _____ 2006 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института
ядерных исследований.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук

 В.Г. Кривохижин

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Линейные резонансные ускорители нашли широкое применение, как инжекторы больших протонных синхротронов. Однако в последнее время их все с большим успехом и все шире используют и для прикладных целей, таких, как радиационная терапия, испытание полупроводниковых приборов, исследование металлов и других конструкционных материалов, экспериментального облучения тканей и образцов космической техники и т. п.

В Сухумском физико-техническом институте для материаловедческих исследований был создан стенд, включающий в себя две секции линейного высокочастотного ускорителя протонов и отрицательных ионов водорода. Первая секция с пространственно однородной ВЧ фокусировкой до энергии 1,96 МэВ (начальная часть ускорителя - НЧУ) была разработана и изготовлена в ИФВЭ для инжектора в бустер Серпуховского синхротрона У-70. Вторая секция с пространственно периодической ВЧ фокусировкой до энергии 7 МэВ (основная часть ускорителя - ОЧУ) была разработана в ИФВЭ специально для данного стенда. Сборка и физический пуск с протонным пучком секции ОЧУ был осуществлен в ИФВЭ. Для включения секции в состав стенда необходимо было провести детальное исследование параметров ускоренного пучка протонов.

На момент начала исследований на материаловедческом стенде СФТИ в мировой практике не было опыта ускорения отрицательных ионов в структурах с ВЧ фокусировкой. Для исследования возможности таких структур впервые в мире были получены на них пучки отрицательных ионов водорода и проведены детальное исследование параметров этих пучков на энергии 1.96 и 7 МэВ.

Для проведения аналогичных исследований, для производства полупроводниковых устройств методом ионной имплантации, для исследования возможностей использования нагрева плазмы в токамак-реакторах пучками атомов водорода и дейтерия и для ряда других прикладных задач разработка

новых ускоряющих структур в диапазоне энергий от нескольких сотен кэВ до нескольких МэВ является актуальной задачей. Одним из возможных решений является применение впервые предложенной новой ускоряющей структуры на основе полицилиндрических резонаторов. Ускоритель такого типа имеет малые габаритные размеры, высокий темп ускорения, может быть использован для ускорения разных сортов ионов. Для проведения измерения сечений перезарядки отрицательных ионов водорода и дейтерия на газовых и плазменных мишенях в рамках проекта ИТЕР было решено использовать ускоритель данного типа.

Для увеличения интенсивности и качества выведенного пучка на Фазотроне ОИЯИ ведутся работы над проектом внешней инжекции, позволяющей увеличить ток выведенного протонного пучка на порядок.

Для этой цели планируется создание системы внешней инжекции в фазотрон на двухсекционном линейном ускорителе отрицательных ионов водорода.

Таким образом, экспериментальные исследования параметров ускоряющих структур с ВЧ квадрупольной фокусировкой, а также разработка и исследования новых типов ускоряющих структур являются *актуальной задачей*.

Основные цели работы:

Разработка и сооружение ускорителя с пространственно-периодической ВЧ-квадрупольной фокусировкой на энергию 7 МэВ.

Формирование и ускорение пучка отрицательных ионов водорода в ускорителях с пространственно-однородной и пространственно-периодической ВЧ-квадрупольной фокусировкой.

Разработка малогабаритных ускорителей ионов для прикладных исследований.

Сооружение и ввод в действие ускорителя отрицательных ионов водорода и дейтерия на основе четвертьволновых полицилиндрических резонаторов на энергию 1–1,5 МэВ для исследования возможностей нагрева плазмы в ИТЕР.

Разработка физического проекта ускорителя отрицательных ионов водорода с ВЧ фокусировкой для внешней инжекции в Фазотрон.

Научная новизна

Впервые разработан и введен в действие линейный ускоритель протонов с пространственно-периодической ВЧ-квадрупольной фокусировкой на энергию 7 МэВ.

Впервые получены пучки отрицательных ионов водорода на ускорителях с пространственно-однородной и пространственно-периодической ВЧ-квадрупольной фокусировкой на энергию 1,96 и 7 МэВ.

Предложена оригинальная конструкция ускорителя ионов на основе четвертьволновых полицилиндрических резонаторов. Разработан и введен в действие такой ускоритель отрицательных ионов водорода до энергии 1,5 МэВ.

Разработан физический проект линейного ускорителя с пространственно-однородной ВЧ-квадрупольной фокусировкой для внешней инжекции в Фазотрон.

Практическая ценность работы

Полученные результаты показали возможность применения ускорителей с ВЧ-квадрупольной фокусировкой для ускорения отрицательных ионов водорода. На материаловедческом стенде СФТИ проведен комплекс исследований на энергиях ионов 1,96 и 7 МэВ, таких как, например, измерение сечения перезарядки отрицательных ионов водорода в нейтральные атомы и протоны на газовых и пленочных мишенях.

Предложенный ускоритель на основе полицилиндрических резонаторов позволяет ускорять ионы разного сорта до энергии 1–1,5 МэВ. Разработка и пуск ускорителя такого типа позволили выявить следующие его основные достоинства:

- малые габаритные размеры (сооруженный ускоритель на энергию протонов 1,5 МэВ имеет длину 65 см, диаметр вакуумного контейнера 67 см.),
- простота в настройке и эксплуатации,
- возможность плавной регулировки выходной энергии частиц,
- возможность ускорения различных сортов ионов.

Секция с пространственно-периодической ВЧ-фокусировкой до энергии 7 МэВ (основная часть ускорителя - ОЧУ) была разработана в ИФВЭ специально для данного стенда. Сборка и физический пуск с протонным пучком секции ОЧУ был осуществлен в ИФВЭ. Для включения секции в состав стенда необходимо было провести детальное исследование параметров ускоренного пучка протонов. Измерение тока пучка осуществлялось индукционными датчиками, установленными на входе ускорителя, между секциями и на выходе ОЧУ, а так же цилиндром Фарадея, который мог устанавливаться на выходе ОЧУ. Форма поперечного сечения пучка наблюдалась по свечению люминесцентного экрана. Для измерения энергетического разброса использовался анализатор на основе поворотного 30°-го магнита со щелевым токоприемником, расположенным после участка дрейфа. Точность измерений разброса частиц по импульсам составляла $\pm 0,5\%$. Измерение эмиттанса пучка на выходе секции проводилось методом двух щелей с использованием многоламельного токоприемника. Измерения производились в двух главных поперечных плоскостях.

Общий измеренный коэффициент захвата составлял 0.7 – 0.8, при токе ускоренного пучка до 120 мА в импульсе длительностью 10 мкс. Энергетический разброс ускоренного пучка не превышал 3,5 %, а при оптимальных режимах и малых токах $\pm 1,5$ %. При токе ускоренного пучка порядка 10 – 20 мА приведенный эмиттанс составлял примерно $3 \cdot 10^{-5}$ см·рад, а при токе 100 мА той же площади соответствовало 20% частиц.

Глава 3 посвящена получению ускоренных пучков отрицательных ионов водорода с энергией 2 и 7 МэВ.

Для ускорения отрицательных ионов водорода был разработан инжектор с источником магнетронного типа в безщелевом варианте с током эмиссии до 70 мА. Согласование параметров пучка инжектора с НЧУ и исследование прохождения пучка по тракту ускорителя проводилось по методикам, которые применялись ранее для исследований протонного пучка. В этих экспериментах были впервые ускорены пучки отрицательных ионов водорода в структуре с ВЧ квадрупольной фокусировкой (Рис. 2).

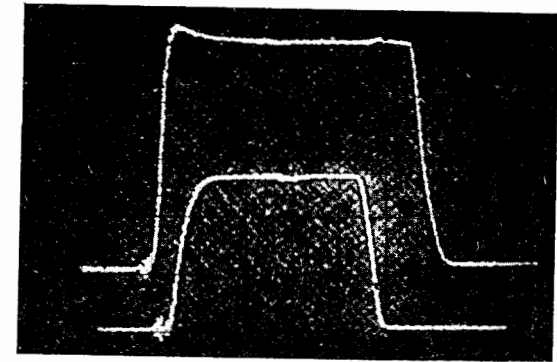


Рис. 2. Оциллограммы огибающих ВЧ поля в НЧУ (верхняя кривая) и ОЧУ (нижняя кривая) при ускорении пучка H с током 15 мА. На сигнале огибающей ОЧУ видна подсадка от тока пучка.

В результате исследований были найдены зависимости тока на выходе из ускорителя от величины ускоряющего высокочастотного поля и энергии инжекции ионов. Оценены потери частиц в ускорителе.

В главе 4 описаны принцип действия и конструкция ускорителя на основе полицилиндрических резонаторов.

Для ускорения различных сортов ионов до энергии 1 – 1.5 МэВ была предложена оригинальная модификация ускорителя на основе коаксиальных резонаторов, позволяющая снизить с одной стороны потери мощности в резонаторе, а с другой стороны осуществить устойчивое ускорение ионов на частоте ВЧ поля 100 – 200 МГц. Такой ускоритель представляет собой цепочку вложенных друг в друга коаксиальных четвертьволновых резонаторов, так, что внешний проводник одного резонатора является одновременно внутренним проводником следующего. При этом мощность потерь из-за деления напряжения в первом приближении уменьшается пропорционально количеству резонаторов. Действительно:

$$P_n = \frac{U_n^2}{2R_3}, \quad U_n \propto \frac{\varepsilon_{total}}{n}$$

где U_n - напряжение на емкостном (ускоряющем) зазоре резонатора, ε - полная энергия ускоряемой частицы, R_{Σ} - эквивалентное сопротивление резонатора, n - количество резонаторов.

Если предположить, что эквивалентные сопротивления вложенных резонаторов примерно равны, то полная мощность потерь в резонаторах при равном делении напряжения падает как n^{-1} :

$$P_{total} \propto \frac{\varepsilon_{total}}{n}$$

Количество резонаторов может, в принципе, быть любым, но при большом количестве резонаторов непомерно растет диаметр ускорителя и в резонаторах при больших диаметрах появляются, кроме основного, высшие типы колебаний. Поэтому при создании ускоряющей системы необходимо ограничиться разумным количеством резонаторов, исходя из условия возникновения высших типов колебаний:

$$\frac{\pi}{2}(D+d) < \lambda_0,$$

где D - внутренний диаметр большого проводника, d - внешний диаметр меньшего проводника.

Все резонаторы настроены на одну частоту и запитываются независимо друг от друга, так что фазы высокочастотных полей в резонаторах могут быть произвольными. Такая полицилиндрическая структура позволяет решить проблему устойчивого ускорения пучка методами фазопеременной фокусировки. Кроме того, во внутреннем проводнике первого резонатора может быть размещен одно- или двухзазорный группирователь, что обеспечит достаточно высокий коэффициент захвата пучка в режим ускорения.

Ускоритель такого типа, разработанный и изготовленный в СФТИ, состоит из пяти вложенных друг в друга четвертьволновых резонаторов, во внутреннем проводнике первого резонатора размещен однозазорный группирователь клистронного типа. Радиотехнический расчет резонатора производился с помощью программы MULTIMODE. Напряжения на зазорах и сдвиги фаз ВЧ

поля между резонаторами рассчитывались с помощью специально разработанной компьютерной программы, моделирующей динамику движения ионов. Расчетные параметры ускорителя приведены в таблице 1, ускоритель в сборе показан на Рис. 3.

Таблица 1. Основные параметры ускорителя

Длина, м	0.7
Диаметр вакуумного контейнера, м	0.67
Диаметр внутреннего цилиндра, м	0.14
Диаметр внешнего цилиндра, м	0.56
Энергия инжекции, кэВ	80
Конечная энергия, МэВ	0.5 – 1.5
Ширина энергетического спектра, %	5 – 10
Коэффициент захвата с однозазорным группирователем, %	40
Собственная частота, МГц	156.5
Напряженность поля в зазорах, кВ/см	180
Расчетная собственная добротность резонаторов	8000
Измеренная собственная добротность	5300
Суммарная мощность ВЧ питания, МВт	2.5

Физический пуск ускорителя был осуществлен в 1995 году. В качестве источника ионов использовался источник H⁺ ионов с объемно плазменным механизмом генерации. Ток инжектируемого пучка составлял 35 мА при длительности импульса 10 – 20 мкс и частоте повторения 0.5 Гц. Длительность импульса ВЧ питания составляла 80 мкс. На выходе ускорителя был получен ток 15 мА в импульсе. Энергия ионов измерялась с помощью магнитного энергоанализатора. Полученный спектр близок к расчетному.

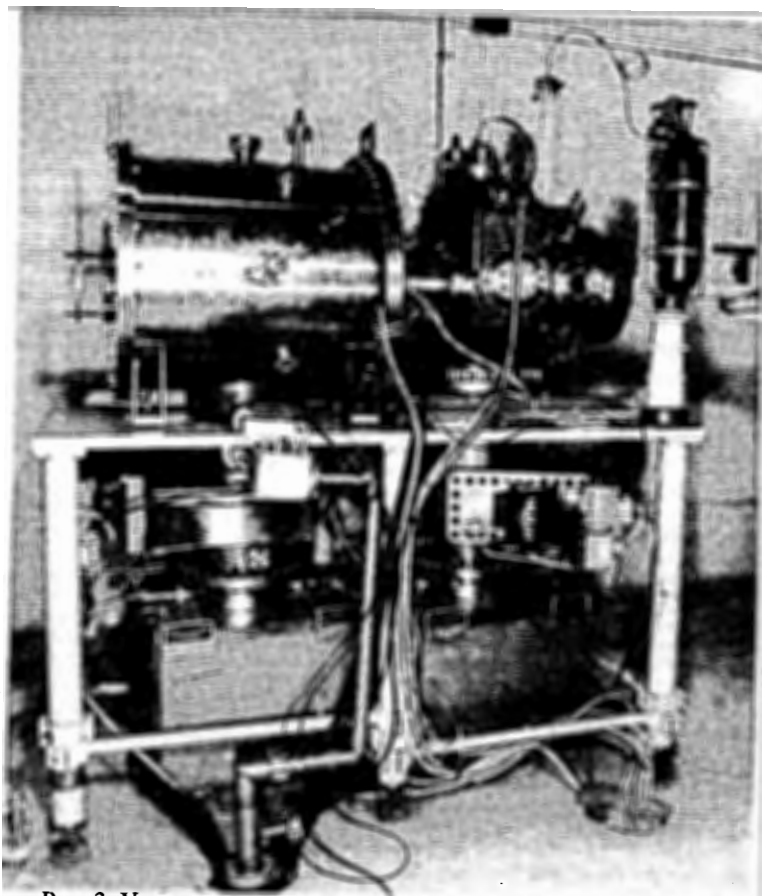


Рис. 3. Ускоритель на основе полицилиндрических резонаторов в процессе сборки.

В главе 5 описывается система внешней инжекции в фазотрон на основе линейного ускорителя с ВЧ квадрупольной фокусировкой.

Для увеличения интенсивности и качества выведенного пучка на фазотроне ОИЯИ ведутся работы над проектом внешней инжекции, позволяющей увеличить ток выведенного протонного пучка на порядок. В настоящее время внутренний ток в фазотроне составляет 5 мкА при частоте модуляции 250 Гц и времени захвата 20 мкс, то есть при макроскважности 200. Таким образом, импульсный

ток составляет 1 мА в течение времени захвата или 1.25×10^{11} частиц. Предполагается увеличить число частиц в импульсе до 1.25×10^{12} частиц.

Одним из возможных путей решения этой задачи является создание системы внешней инжекции в фазотрон на двухсекционном линейном ускорителе отрицательных ионов водорода. Ускоренные отрицательные ионы водорода перезаряжаются на газовой мишени. Нейтральный пучок инжектируется в фазотрон, где перезаряжается в протоны, которые и захватываются в режим ускорения. Ключевым элементом схемы внешней инжекции в фазотрон является ускоритель отрицательных ионов водорода.

Для этой цели разработан ускоритель, состоящий из двух секций начальной части ускорителя с ПОКФ фокусировкой (НЧУ-1, НЧУ-2). Основные проектные параметры варианта ускоряющей системы приведены в таблице 2.

Таблица 2. Проектные параметры ускорителя для внешней инжекции в фазотрон.

	НЧУ-1	НЧУ-2
Энергия инжекции, МэВ	0,098	1,9
Выходная энергия, МэВ	1,9	5
Ток пучка, мА	50	50
Режим работы импульсный:		
-частота следования импульсов, Гц	250	250
-длительность импульса тока пучка (по уровню 0,9), мкс	80	80
-длительность ВЧ-импульса (по уровню 0,1 без учета длительности среза импульса), мкс	130	130
Рабочая частота ВЧ-поля, МГц	144,8	144,8
Амплитуда номинального ускоряющего напряжения, кВ	150	150
Синхронная фаза, град	90±30	30
Собственная добротность резонаторов	$1,6 \times 10^4$	$1,6 \times 10^4$
Шунтовое сопротивление резонатора, кОм	46,3	45
Мощность собственных потерь в резонаторе не более, кВт	243	250
Мощность, потребляемая пучком, кВт	90,1	150

К.п.д. резонатора, %	27	38
Постоянная времени резонатора, нагруженного ВЧ-системой, при критической связи с резонатором, мкс	17,5	17,5
Точность подстройки частоты резонатора, кГц	1	1
Максимальная мощность ВЧ-генератора, кВт	500	500
Нестабильность амплитуды ВЧ-поля не более, %	±2	±2
Нестабильность фазы ВЧ-поля не более, град	±2	±2

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы.

Выводы

1. В результате настройки и тестирования ускорителя протонов с пространственно периодической ВЧ фокусировкой на энергию 7 МэВ экспериментально установлено, что общий измеренный коэффициент захвата составляет 0.7 – 0.8, при токе ускоренного пучка до 120 мА в импульсе длительностью 10 мкс. Энергетический разброс ускоренного пучка не превышает 3,5 %, а при оптимальных режимах и малых токах ± 1,5 %. При токе ускоренного пучка порядка 10 – 20 мА приведенный эмиттанс составляет примерно $3 \cdot 10^{-5}$ см·рад, а при токе 100 мА той же площади соответствует 20% частиц. Данные параметры полностью удовлетворяют требованиям стенда для проведения материаловедческих исследований.
2. В экспериментах на стенде СФТИ с источником магнетронного типа в безэзиевом варианте были впервые ускорены пучки отрицательных ионов водорода в структуре с ВЧ квадрупольной фокусировкой. Согласование параметров пучка отрицательных ионов водорода из инжектора с НЧУ и исследование прохождения пучка по тракту ускорителя проводилось по методикам, которые применялись ранее для исследований протонного пучка. В результате исследований были оптимизированы величины ускоряющего высокочастотного поля и энергии инжекции ионов. Максимальный ускоренный ток при энергии 7 МэВ составил 17 мА.

3. Для ускорения различных сортов ионов до энергии 1 – 1.5 МэВ была предложена оригинальная конструкция ускорителя на основе полицилиндрических резонаторов. Такой ускоритель представляет собой цепочку вложенных друг в друга коаксиальных четвертьволновых резонаторов, запитываемых независимо друг от друга. При этом структура имеет малые габаритные размеры, а мощность потерь из-за деления напряжения уменьшается пропорционально количеству резонаторов. Во внутреннем проводнике первого резонатора может быть размещен одно- или двухзачерный группирователь, что обеспечивает достаточно высокий коэффициент захвата пучка в режим ускорения.
4. В СФТИ для исследования процесса перезарядки H^+ , D^+ ионов на газовой и плазменной мишенях при энергии 1 – 1.5 МэВ был разработан и изготовлен ускоритель на основе полицилиндрических резонаторов. Физический пуск ускорителя был осуществлен в 1995 году. На выходе ускорителя был получен ток 15 мА в импульсе при токе инжекции 35 мА. Энергетический спектр ускоренного пучка близок к расчетному.
5. Для внешней инжекции в фазотрон предложен линейный ускоритель отрицательных ионов водорода, состоящий из двух секций с ПОКФ фокусировкой с конечной энергией 5 МэВ и током пучка до 50 мА. Длина ускорителя составляет 3.5 м. Импульсная мощность ВЧ питания около 750 кВт, частота ускоряющего поля равна 144,8 МГц. Применение такого ускорителя позволит увеличить число частиц в импульсе с 1.25×10^{11} до 1.25×10^{12} частиц.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. В.В.Кобец, Е.М.Сырессин, О.К.Беляев, И.Г.Мальцев, В.Б.Степанов, В.А.Тепляков, Форинжектор на базе линейного ускорителя для внешней инжекции в фазотрон ОИЯИ, Письма в ЭЧАЯ, 2005, Т. 2, № 3 (126), стр. 29 – 33.
2. А.К.Геворков, В.В.Кобец, И.С.Савченко, Л.П.Скрипаль, В.П.Сидоров, А.О.Сидорин, Экспериментальный стенд для исследования процесса

перезарядки H^+ , D^+ ионов на газовой и плазменной мишенях, Сборник докладов XIV совещания по ускорителям заряженных частиц, Протвино, 1994, стр. 90 - 93.

3. Кобец В.В. и др., Исследование характеристик НЧУ и компенсации спада напряженности поля на ускорителе стенда «Модуль», Отчет СФТИ, № 5716, 1979.
4. Кобец В.В. и др., Исследование параметров сильноточного пучка протонов и характеристик ВЧ-системы ускорителя на энергию 7 МэВ стенда «Модуль», Отчет СФТИ, № 5774, 1980.
5. Кобец В.В. и др., Экспериментальное исследование инжектора отрицательных ионов водорода с ускорителем стенда «Модуль», Отчет СФТИ, № 6380, 1983.
6. Геворков А.К., Карпюк И.А., Кобец В.В., АС № 301077 от 01.09.89.
7. Кобец В.В., Сидорин А.О., Малогабаритный линейный ускоритель ионов на основе полицилиндрических резонаторов, Атомная энергия, ~~№~~, 2006, т. 100, вып. 5, стр. 402-404.

Получено 12 мая 2006 г.