

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Б. П. КОНСТАНТИНОВА

УДК 621.039; 621.3.615

На правах рукописи

ЕЛИСЕЕВ  
Сергей Александрович

ПРЕЦИЗИОННАЯ ВРЕМЯПРОЛЁТНАЯ МАСС-  
СПЕКТРОМЕТРИЯ ДЛЯ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МАСС  
КОРОТКОЖИВУЩИХ НУКЛИДОВ

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2006

Работа выполнена в Петербургском институте ядерной физики им. Б. П. Константинова РАН и Научно-исследовательском центре ГСИ (Дармштадт, Германия).

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор

Ю.Н. Новиков,

доктор физико-математических наук

Д.М. Селиверстов,

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук

М.И. Явор,

кандидат физико-математических наук

В.Ф. Ежов,

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт физики им. В. А. Фока Санкт-Петербургского государственного университета.

Защита состоится «\_\_\_\_\_» 2006 г. в \_\_\_\_\_ час.  
на заседании диссертационного совета Д-002.115.01 при  
Петербургском институте ядерной физики им. Б. П. Константинова  
РАН по адресу: 188300, г. Гатчина, Ленинградской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПИЯФ РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

И.А. Митропольский

## Актуальность проблемы

Создание масс-спектрометров на базе ловушки Пеннинга привело к возможности проведения прецизионных измерений (с точностью порядка нескольких кэВ) масс радиоактивных нуклидов, удаленных от полосы  $\beta$ -стабильности, имеющих малые сечения образования и малые времена жизни. Подобные масс-спектрометры обычно состоят из нескольких ключевых элементов: прибора, который служит для согласования эммитанса входящего в систему пучка с аксептансом ловушки Пеннинга, системы проводки пучка и собственно ловушки Пеннинга.

Одним из таких примеров является установка SHIPTRAP [1], представляющая собой систему ионных ловушек, установленных после селектора скоростей SHIP [2]. Комплекс SHIP, базирующийся на ускорителе тяжёлых ионов UNILAC (ГСИ, Дармштадт), предназначен главным образом для синтеза тяжёлых и сверхтяжёлых элементов. Поэтому система ловушек SHIPTRAP позволит проводить уникальные и пока ещё единственные в мире измерения масс сверхтяжёлых нуклидов. Установка предназначена также для измерений масс экзотических ядер на границах их существования (протонных излучателей, нуклидов, принимающих участие в астрофизических процессах и т. д.). Кинетическая энергия продуктов реакции “слияния-испарения”, используемой в SHIP, находится в пределах 20-500 А·кэВ. Диаметр пучка на выходе SHIP равен примерно 5 см при ширине энергетического распределения на полувысоте, равного примерно 10%.

Наилучшим способом согласования параметров пучка из SHIP с аксептансом ловушки Пеннинга является использование газонаполненной камеры [3], в которой продукты реакции замедляются и термализуются в соударениях с молекулами газа. Такие важные параметры масс-спектрометра SHIPTRAP, как эффективность и быстроедействие, в основном определяются газонаполненной камерой. Таким образом, всестороннее исследование параметров газонаполненной камеры является ключевым шагом для оптимизации работы всего масс-спектрометра.

Для исследования параметров газонаполненной камеры необходимы диагностирующие приборы. Одним из таких приборов является времяпролетный масс-спектрометр с ортогональным извлечением ионов (Орто-ВП МС). Применение данного масс-спектрометра как диагностического прибора для вышеупомянутых целей обусловлено его относительной простотой при высокой

разрешающей способности, быстродействием и достаточной чувствительностью.

Актуальность диссертации состоит в том, что она посвящена исследованию важнейшего блока системы SHIPTRAP, обеспечившего прецизионные измерения масс экзотических ядер, представляющих интерес как для ядерной физики слабо связанных систем, сверхтяжёлых элементов, так и для астрофизики.

## **Цель работы**

Основными целями данной работы являются:

1. создание варианта времяпролётного масс-спектрометра с ортогональным извлечением ионов, предназначенного для ядерно-физических исследований; проведение детального, как экспериментального, так и теоретического, исследования таких параметров Орто-ВП МС, как его эффективность, разрешающая способность по массе, а также чувствительность для двух режимов работы: непрерывного режима и режима банчирования;
2. использование Орто-ВП МС для исследования параметров газонаполненной камеры SHIPTRAP;
3. проведение всестороннего исследования ключевых параметров газонаполненной камеры SHIPTRAP, таких как время и эффективность извлечения ионов, в зависимости от давления гелия, градиента осевого электрического поля и положения ионов в газонаполненной камере; исследование влияния химических процессов, обусловленных наличием примесей в камере, на вышеперечисленные параметры;
4. проведение первых *on-line* измерений на установке SHIPTRAP масс радиоактивных нуклидов в области протонного излучателя  $^{147}\text{Tm}$ .

## **Научная новизна работы.**

В работе создан времяпролётный масс-спектрометр с ортогональным извлечением ионов (Орто-ВП МС) для ядерно-физических исследований. Проведено детальное теоретическое и экспериментальное исследование эффективности, разрешающей способности по массе, а также чувствительности для двух режимов работы: непрерывного режима и режима банчирования.

Измерено значение эффективности Орто-ВП МС, которое равно ~ 1% и 3% в непрерывном и дискретном режимах, соответственно. Максимальная разрешающая способность по массе, достигнутая на

этом приборе, равна  $\sim 20000$ . Чувствительность прибора достигает 0.2 иона в секунду.

Орто-ВП МС был впервые использован в качестве диагностического прибора для исследования параметров газонаполненной камеры SHIPTRAP.

Впервые проведено детальное исследование ключевых параметров газонаполненной камеры SHIPTRAP и влияния на них химических процессов, возникающих от примесей в камере.

Проведены первые *on-line* измерения на установке SHIPTRAP масс радиоактивных нуклидов из области, непосредственно примыкающей к протонным излучателям. Были измерены массы следующих нуклидов:  $^{143,147}\text{Tb}$ ,  $^{142-148}\text{Dy}$ ,  $^{144-148}\text{Ho}$ ,  $^{146-148}\text{Er}$ ,  $^{147-148}\text{Tm}$ . Погрешность определения масс для основной массы нуклидов лежит в районе 10 кэВ.

## **Практическая ценность**

Созданный для целей ядерной физики Орто-ВП МС демонстрирует большие возможности данного класса масс-спектрометров в качестве измерительных и диагностирующих приборов. Они эффективно могут быть использованы для исследования газонаполненных систем, функционирующих в качестве трансформатора параметров ионного пучка.

Результаты, полученные при исследовании газонаполненной камеры SHIPTRAP, демонстрируют высокую эффективность и быстродействие подобного рода систем, что способствует дальнейшему их развитию.

Система SHIPTRAP эффективно может быть использована для индикации и ультравысокой сепарации весьма слабых радиоактивных источников (со скоростью счёта до нескольких Бк). В ядерно-физических экспериментах она служит идеальным инструментом, когда требуются высокоточные измерения масс короткоживущих нуклидов с временами жизни до 0.5 с, образуемых с сечениями вплоть до  $\sim 60$  микробарн.

## **Структура, содержание и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения, 4 приложений и включает 14 таблиц и 83 рисунка.

Во введении представлен обзор современного состояния и тенденций развития масс-спектрометров как на основе методики времени пролета, так и на базе ловушек Пеннинга. Поставлена общая задача исследований.

В первой главе представлены теоретические основы работы составных частей времяпролетного масс-спектрометра Орто-ВП МС: (1) ионные источники трех видов: электроспрей, ионный источник поверхностной ионизации и нерезонансный лазерный ионный источник, (2) линейная газонаполненная РЧ ловушка и (3) времяпролетная база.

Вторая глава посвящена описанию основных принципов работы масс-спектрометров на базе ловушки Пеннинга. Дано описание метода удержания ионов в ловушке Пеннинга и различные методы определения массы иона в ловушке Пеннинга.

В третьей главе приведено описание установки SHIPTRAP. Дано описание ее составных частей: газонаполненной камеры, радиочастотного газонаполненного квадруполя, ловушки Пеннинга и Орто-ВП МС. Так как одной из задач автора являлось построение Орто-ВП МС, то в данной главе упор делается на подробное описание Орто-ВП МС и его составных частей. Установка SHIPTRAP схематично приведена на Рис. 1.

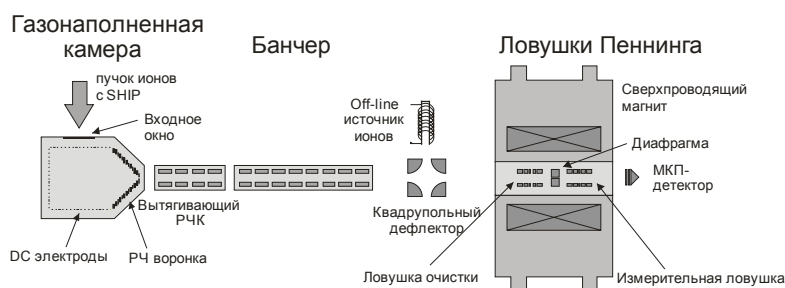


Рис. 1. Схема установки SHIPTRAP

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию свойств линейной газонаполненной РЧ ловушки и основных параметров Орто-ВП МС.

Представлена новая конструкция линейной РЧ ловушки, основанной на РЧ квадруполе LINAC II (PE SCIEX патент). Было проведено детальное исследование её свойств для двух режимов

работы: непрерывного режима и режима банчирования. Исследовались следующие параметры: 1) энергетическое распределение ионов  $\text{Cs}^+$ , извлечённых из РЧ ловушки, как функция давления гелия в ней и как функция амплитуды РЧ поля, 2) время пролёта ионов  $\text{Cs}^+$  через РЧ ловушку как функция давления гелия, 3) вместимость РЧ ловушки и 4) энергетическое распределение ионов  $\text{Cs}^+$ , извлечённых из РЧ ловушки, как функция их количества в ловушке. На Рисунках 2-6 результаты данного исследования изображены графически.

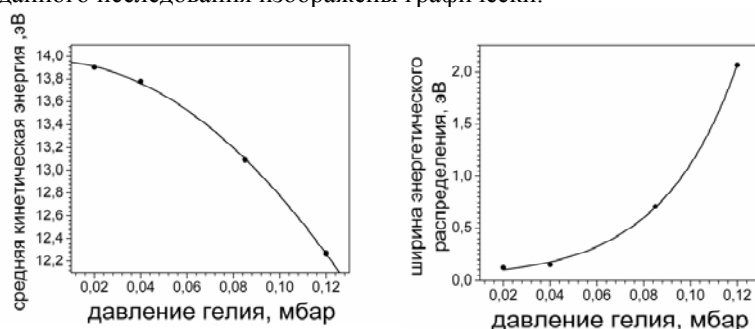


Рис.2. Измеренная средняя кинетическая энергия ионов (левый график) и ширина (на полувысоте) энергетического распределения ионов (правый график), извлечённых из РЧ ловушки в непрерывном режиме, в зависимости от давления буферного газа в РЧ ловушке. Ошибки измерения меньше размера точек

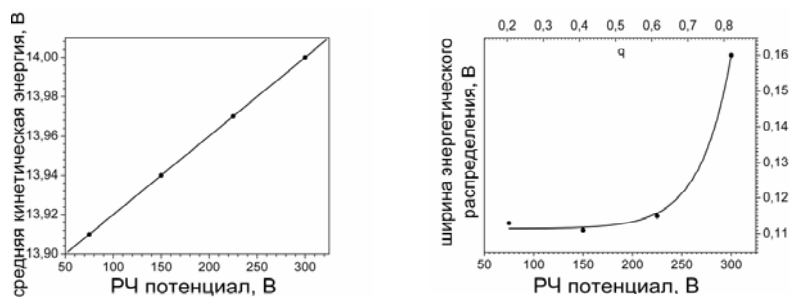


Рис.3. Измеренная средняя кинетическая энергия ионов (левый график) и ширина энергетического распределения ионов после охлаждения (правый график), извлечённых из РЧ ловушки в непрерывном режиме, как функция РЧ потенциала, приложенного к РЧ квадруполю. Ошибки измерения меньше размера точек

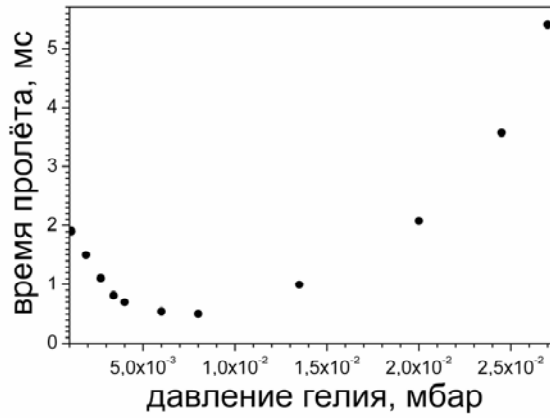


Рис.4. Измеренное время пролёта ионов через РЧ ловушку в зависимости от давления гелия в РЧ ловушке. Ошибки измерения меньше размера точек

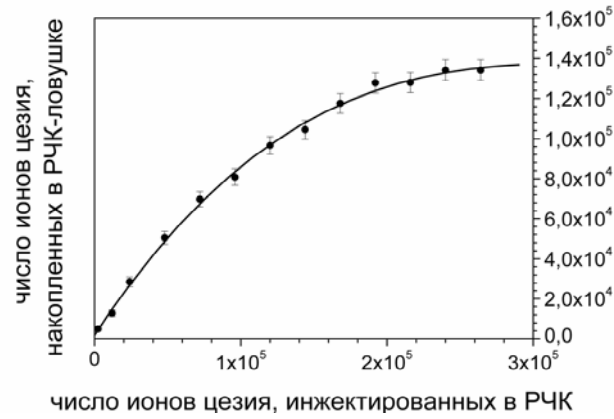


Рис.5. Экспериментальная зависимость числа ионов, накопленных в РЧ ловушке, от числа ионов, инжектированных в РЧ ловушку. Ионная вместимость РЧ ловушки (максимальное число ионов, которое можно накопить в РЧ ловушке) равна примерно  $1.4 \cdot 10^5$  ионов и ограничивается влиянием пространственного заряда ионов в РЧ ловушке



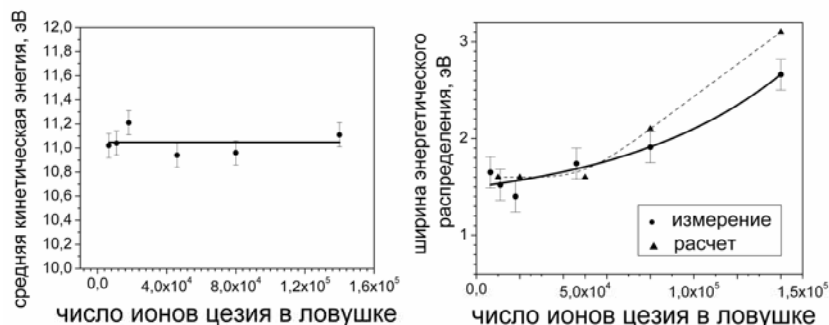


Рис.6. Измеренные значения средней кинетической энергии (левый график), ширины энергетического распределения (правый график, непрерывная линия), а также результаты расчётов в коде SIMION ширины энергетического распределения (пунктирная линия) ионов, извлечённых из РЧ ловушки в режиме банчирования, как функция числа ионов в РЧ ловушке.

Измеренное значение ширины энергетического распределения ионов  $\text{Cs}^+$  в непрерывном режиме равно примерно 0.1 эВ. В режиме банчирования ширина энергетического распределения ионов  $\text{Cs}^+$  равна примерно 1.5 эВ и растёт с ростом числа ионов. Ёмкость РЧ ловушки равна  $\sim 10^5$  ионов  $\text{Cs}^+$ , время пролёта ионов  $\text{Cs}^+$  лежит в пределах 1 мс.

Исследование основных параметров Орто-ВП МС включало в себя исследование эффективности, массовой разрешающей способности и чувствительности Орто-ВП МС. В результате данного исследования было показано, что максимальная эффективность Орто-ВП МС равна  $\sim 3\%$  в режиме банчирования и  $\sim 1\%$  в непрерывном режиме. Полученное максимальное массовое разрешение Орто-ВП МС составило 20000. Минимальная интенсивность пучка ионов на входе Орто-ВП МС, при которой отношение сигнала к шуму становится больше 2, равна примерно 0.2 иона в секунду (чувствительность Орто-ВП МС).

Пятая глава посвящена теоретическому исследованию свойств Орто-ВП МС. Изучалось влияние различных частей Орто-ВП МС на массовую разрешающую способность, эффективность и чувствительность масс-спектрометра и проводилось сравнение расчетных значений вышеупомянутых параметров масс-спектрометра с измеренными значениями, приведенными в четвертой главе. Было

показано, что расчетные значения хорошо согласуются с измеренными значениями.

*Шестая глава* посвящена детальному исследованию газонаполненной камеры установки SHIPTRAP. Были измерены эффективность и время извлечения радиоактивных нуклидов из газонаполненной камеры, а также влияние примесей в буферном газе (гелий) на эти параметры. Для этого использовались ионы отдачи  $^{219}\text{Rn}$  от  $\alpha$ -распада откалиброванного, точечного радиоактивного источника  $^{223}\text{Ra}$ , установленного внутри нее. Для измерений эффективности и времени извлечения продуктов из газонаполненной камеры использовался поверхностно-барьерный детектор, смонтированный позади извлекающего РЧ квадруполь (РЧК). Для исследования примесей, извлеченных из газонаполненной камеры, записывались массовые спектры с помощью времяпролётного масс-спектрометра с ортогональным вытягиванием (Орто-ВП МС). На Рисунках 7–11 результаты данного исследования изображены графически.

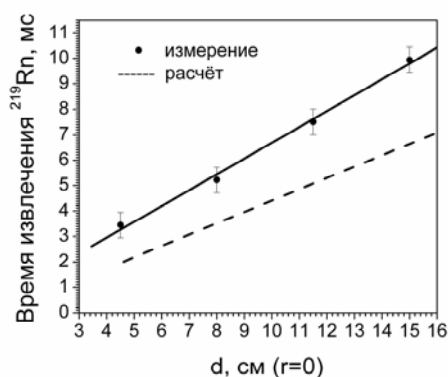


Рис.7. Время извлечения ионов  $^{219}\text{Rn}$  для давления газа 40 мбар как функция расстояния  $d$  от источника  $^{223}\text{Ra}$  до сопла (при  $r = 0$ ). Прямая линия является результатом фитирования экспериментальных точек. Пунктирная линия представляет время извлечения, рассчитанное на основании формализма подвижности ионов (приведенная подвижность для  $^{219}\text{Rn}^+$  в He равна  $18.5 \text{ см}^2/(\text{сВ})$ )

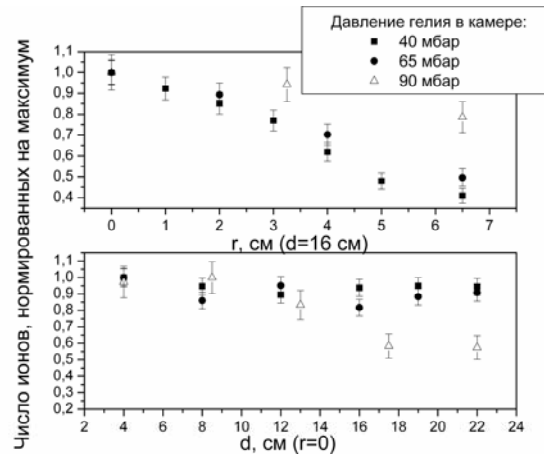


Рис. 8. Относительная эффективность извлечения ионов  $^{219}\text{Rn}$  как функция аксиального расстояния  $d$  источника  $^{223}\text{Ra}$  от выходного сопла (верхний график) и как функция радиального расстояния  $r$  (нижний график) от оси. Осевое электрическое поле было равно 10 В/см.

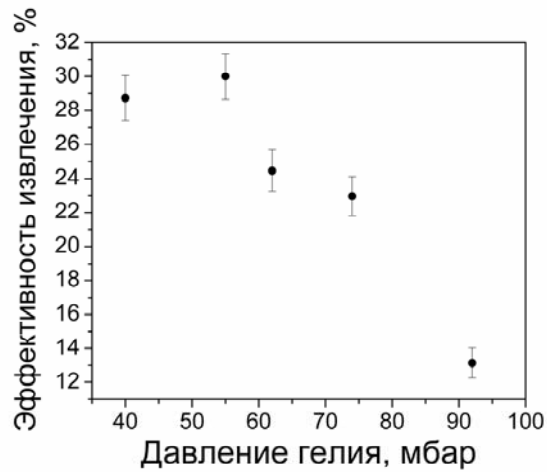


Рис. 9. Абсолютная эффективность извлечения ионов  $^{219}\text{Rn}$  как функция давления гелия в газонаполненной камере. Осевое электрическое поле равнялось 10 В/см.

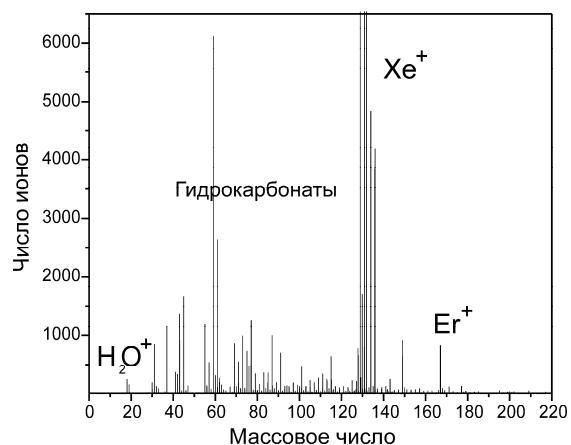


Рис. 10. Типичный массовый спектр ионов, извлечённых из газонаполненной камеры перед тем, как она была отогрета. Изотопы ксенона поступают в газонаполненную камеру вместе с гелием

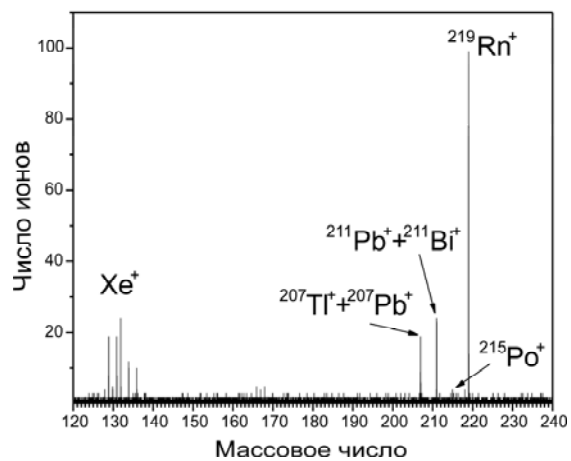


Рис. 11. Типичный массовый спектр ионов, извлечённых из газонаполненной камеры после того, как камера была прогрета в течение 20 часов при 150°C. Использовался обычный гелий 4.6. Массовые области с  $A < 120$  и с  $A > 240$  не показаны, так как в них отсутствуют пики

Результаты показывают, что извлечение ионов из камеры происходит достаточно быстро по сравнению со скоростью нейтрализации, и нуклиды с периодами полураспада, превышающими 10 мс, доступны на установке SHIPTRAP для различного рода экспериментов.

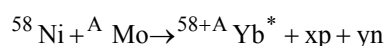
Ожидаемая полная эффективность газонаполненной камеры, определяемая как произведение рассчитываемой эффективности остановки ионов в газе и измеряемой эффективности извлечения, равна примерно 10%. Данное значение можно сравнить со значением, измеренным в *on-line* режиме и равным примерно 5% [3]. Полная эффективность ограничивается низкой эффективностью остановки ионов при низких давлениях гелия и уменьшением эффективности извлечения ионов при высоком давлении. Усовершенствование РЧ воронки и извлекающего РЧК позволит увеличить рабочее давление гелия в газонаполненной камере с 50 мбар до 80-90 мбар для того, чтобы увеличить эффективность остановки с нынешних ~25% до ~80% без значительного уменьшения эффективности извлечения. Таким образом, можно увеличить полную эффективность газонаполненной камеры с 10% до 25-30%.

В режиме низкой интенсивности входного пучка, когда пространственный электрический заряд не оказывает воздействия на функционирование газонаполненной камеры, ионно-молекулярные реакции не ограничивают эффективность газонаполненной камеры. Прогревание камеры в течение 20 часов при температуре 150<sup>0</sup>С является достаточным для очистки камеры от органических соединений, таких как гидрокарбонаты и вода. Применение в газовой линии холодной ловушки, охлажденной до температуры жидкого азота, позволяет существенно уменьшить концентрацию благородных газов в газонаполненной камере.

В присутствии интенсивного *on-line* пучка степень ионизации гелия может значительно отличаться от той, которая создавалась радиоактивным источником <sup>223</sup>Ra. Это может приводить к существенно большим временам извлечения в связи с экранированием осевого электрического поля пространственным зарядом [4] и, как результат, к более низкой эффективности извлечения [3]. Таким образом, влияние эффектов нейтрализации и обмена зарядом на характеристики газонаполненной камеры необходимо исследовать в условиях *on-line* измерений на пучке установки SHIP.

В седьмой главе приводятся результаты первого *on-line* измерения массы  $^{107}\text{Ag}$  с помощью Орто-ВП МС. Оно было призвано показать способность Орто-ВП МС проводить измерения масс нуклидов в *on-line* режиме с относительно большой точностью. Статистическая точность определения массы  $^{107}\text{Ag}$  в данном эксперименте равнялась примерно  $5 \cdot 10^{-7}$ , что соответствует примерно 50 кэВ.

Восьмая глава посвящена описанию первых *on-line* измерений масс радиоактивных нуклидов, выполненных на установке SHIPTRAP. Исследовались нуклиды  $^{144-148}\text{Ho}$ ,  $^{146-148}\text{Er}$ ,  $^{147-148}\text{Tm}$ ,  $^{143-148}\text{Dy}$ ,  $^{143}\text{Tb}$  и  $^{147}\text{Tb}$ . Массы нуклидов  $^{144-146}\text{Ho}$ ,  $^{146-148}\text{Er}$ ,  $^{147}\text{Tm}$ ,  $^{148}\text{Tm}$  и  $^{143}\text{Dy}$  были впервые измерены в данном эксперименте, массы нуклидов  $^{147-148}\text{Ho}$ ,  $^{144-148}\text{Dy}$ ,  $^{143}\text{Tb}$  и  $^{147}\text{Tb}$ , известных ранее, измерялись в данном эксперименте для определения систематической ошибки. Исследуемые нуклиды были получены в реакции слияния-испарения на установке SHIP:



Мишень состояла на 95% из изотопа  $^{92}\text{Mo}$  и на 5% из остальных стабильных изотопов Мо. Сечения слияния-испарения для различных выходных каналов были подсчитаны с использованием компьютерного кода NIVAP [5]. Максимальным сечением порядка 100 мбарн обладает выходной канал  $^{147}\text{Ho} + 3\text{p}$  при энергии налетающего пучка примерно 4.36 А·МэВ (данная энергия использовалась в эксперименте). Остальные нуклиды образуются с сечениями порядка от одного до нескольких десятков миллибарн.

Интенсивность пучка  $^{58}\text{Ni}^{14+}$  равнялась 100 чнА (частиц наноАмпер). Толщина мишени  $^{92}\text{Mo}$  равнялась 670 мг/см<sup>2</sup>. При данных условиях на вход в газонаполненную ячейку SHIPTRAP поступало порядка 1000 полезных нуклидов в секунду (измерено с помощью кремниевого детектора перед газовой ячейкой). Так как SHIP не является масс-фильтром, то в газовую ячейку попадал коктейль из всех продуктов реакции.

Дефект масс для исследованных нуклидов представлен в Табл. 1. Он рассчитывался по формуле

$$ME = [M_{\text{атом}} - A],$$

где  $A$  – атомное число нуклида,  $M_{атом}$  – его атомная масса в аем (атомная массовая единица = 931.494 МэВ).

$^{148}\text{Ho}$ ,  $^{147}\text{Er}$  и  $^{143}\text{Tb}$  имеют долгоживущие изомерные состояния, масса которых отличается от массы основных состояний примерно на 100 кэВ. Эти два состояния не были разрешены в данном эксперименте, что привело к большой ошибке определения их масс.

Таблица 1

Значения масс исследуемых нуклидов (первая колонка), измеренных в данном эксперименте. В третьей колонке приводится их сравнение с литературными значениями [6]. Значения, помеченные #, являются экстраполированными в [6]. В скобках указаны статистические погрешности измерений. Индексы GS и IS обозначают основное и изомерное состояния, соответственно.

Нуклид	$ME_{\text{эксперимент}}, \text{кэВ}$	$ME_{\text{литература}}, \text{кэВ}$	$ME_{\text{экспер-}} \text{ME}_{\text{литература}}, \text{кэВ}$
$^{144}\text{Ho}$	-44610(9)	-45196 (298) #	586(298)
$^{145}\text{Ho}$	-49121(8)	-49183 (298) #	62(298)
$^{146}\text{Ho}$	-51239(8)	-51568(196) #	329(196)
$^{147}\text{Ho}$	-55759(6)	-55837 (28)	78(29)
$^{148}\text{Ho}$	-57969(62)	-58015 (129)	46(143)
$^{146}\text{Er}$	-44323(8)	-44712 (298) #	389(298)
$^{147}\text{Er}$	-46609(38)	-47050(298)#	441(300)
$^{148}\text{Er}$	-51486(12)	-51651(196) #	165(196)
$^{147}\text{Tm}$	-35975(7)	-36365 (298) #	390(298)
$^{148}\text{Tm}$	-38772(12)	-39272(401)#	500(401)
$^{143}\text{Dy}^{\text{GS}}$	-52178(16)	-52300 (200) #	122(201)
$^{143}\text{Dy}^{\text{IS}}$	-51851 (13)	-51990 (200) #	139(200)
$^{144}\text{Dy}$	-56571(8)	-56585(31)	14(32)
$^{145}\text{Dy}$	-58244(8)	-58288 (46)	44 (47)
$^{146}\text{Dy}$	-62556(8)	-62554 (27)	-2(28)
$^{147}\text{Dy}^{\text{GS}}$	-64188(13)	-64188(20)	0(24)
$^{147}\text{Dy}^{\text{IS}}$	-63451(9)	-63438(20)	-13(22)
$^{148}\text{Dy}$	-67862 (9)	-67860(11)	-2 (14)
$^{143}\text{Tb}$	-60420 (51)	-60434 (60)	14 (78)
$^{147}\text{Tb}$	-70750 (9)	-70752 (12)	2(15)

Массы  $^{148}\text{Ho}$ ,  $^{144-148}\text{Dy}$ ,  $^{143}\text{Tb}$  и  $^{147}\text{Tb}$ , измеренные в данном эксперименте, совпадают в пределах погрешности со значениями, полученными другими методами [6]. Значение массы  $^{147}\text{Ho}$ , измеренной в данном эксперименте, отличается больше, чем на три стандартных отклонения, от значения, полученного в [7]. Массы девяти изотопов  $^{144-146}\text{Ho}$ ,  $^{146-148}\text{Er}$ ,  $^{143}\text{Dy}$  и  $^{147,148}\text{Tm}$  были измерены впервые.

*В заключении* приводится краткое описание полученных результатов, выносимых на защиту.

*В приложениях* даны подробные выводы формул, содержащихся в главах диссертации.

### **На защиту выносятся следующие результаты:**

1. Создание времяпролётного масс-спектрометра с ортогональным извлечением ионов, предназначенного для ядерно-физических исследований. Проведение детального экспериментального и теоретического исследования параметров Орто-ВП МС: его эффективности, разрешающей способности по массе, а также чувствительности для двух режимов его работы: непрерывного режима и режима банчирования.

Измеренное значение эффективности Орто-ВП МС равно ~ 1% и 3% в непрерывном режиме и режиме банчирования, соответственно. Максимальная разрешающая способность по массе, достигнутая на этом приборе, равна ~20000. Чувствительность прибора достигает 0.2 иона в секунду. Измеренные значения находятся в хорошем согласии с расчетными значениями.

Использование Орто-ВП МС для исследования параметров газонаполненной камеры SHIPTRAP.

2. Проведение детального исследования ключевых параметров газонаполненной камеры SHIPTRAP, таких как время и эффективность извлечения ионов, в зависимости от давления гелия, градиента осевого электрического поля и положения ионов в камере. Исследование влияния химических процессов, обусловленных наличием примесей в камере, на характеристики камеры.

Полученное время извлечения ионов меньше, чем 10 мс. Эффективность извлечения ионов достигает значения 30%.



3. Проведение на установке SHIPTRAP первых *on-line* измерений масс радиоактивных нуклидов в области, непосредственно примыкающей к протонным излучателям. Были измерены массы следующих экзотических нуклидов:  $^{143,147}\text{Tb}$ ,  $^{143-148}\text{Dy}$ ,  $^{144-148}\text{Ho}$ ,  $^{146-148}\text{Er}$ ,  $^{147,148}\text{Tm}$ . Массы девяти из них измерены впервые. Статистическая погрешность определения масс лежит ниже значения 10 кэВ, что является типичным для ионных ловушек радиоактивных пучков последнего поколения и относится к сверхпрецизионным значениям для прямых измерений масс радиоактивных нуклидов.

### **Апробация работы**

Результаты данной работы были представлены и доложены на следующих конференциях и семинарах:

1. Летняя физическая школа Ecole de Physique Les Houches, Франция, 2002,
2. Конференция немецкого физического общества (DPG) Hannover 2003,
3. Proceedings of the 51st ASMS Conference of Mass Spectrometry and Allied Topics, Montreal, Canada, 8.-12. June 2003,
4. HITRAP-Ioncatcher-Nipnet 4th joint collaboration meeting, Munich, 2005,
5. Конференция немецкого физического общества (DPG) Berlin, 2005,
6. Научный семинар отделения физики высоких энергий ПИЯФ РАН, 2006,
7. Научный семинар кафедры ядерной физики СПбГУ, 2006,
8. Конференция немецкого физического общества (DPG) Frankfurt, 2006,
9. International Workshop on Stopping and Manipulating of Ions, Groningen SMI-2006.

### **Публикации полученных результатов**

Основные результаты, полученные в данной работе, опубликованы в следующих изданиях:

1. M. Weidenmüller, S.A. Elisseev et al.,  
“Study of Cooling and Storage Properties of a Gas-Filled Linear Paul Trap Coupled to a Time-of-Flight Mass Spectrometer for Mass Measurements of Exotic Nuclei.”,

- Hyperfine Interactions **146/147** (2003) 219-224.
2. J.B. Neumayr, S.A. Eliseev et al.,  
“The ion-catcher device for SHIPTRAP.”  
Nucl.Inst.Meth. **B 244** (2006) 489-500.
  3. С.А. Елисеев, М. Блок, А. Чодхури, З. Ди, Ф. Херфурт, Х.-Ю. Клуге,  
Ю.Н. Новиков, В. Пласс, К. Раут, Г.К. Воробьев.  
“Исследование извлечения радиоактивных продуктов из  
газонаполненной камеры установки SHIPTRAP.”  
Препринт ПИЯФ-2663, 2006, 13с.
  4. С.А. Елисеев и А.Ф. Додонов.  
“РЧ-квадруполь с геометрией электродов LINAC II для охлаждения  
и банчирования пучков ионов.”  
Препринт ПИЯФ-2664, 2006, 17с.

#### Список цитированной литературы:

- [1] J. Dilling et al., Hyperfine Interactions **127** (2000) 491-496.
- [2] G. Münzenberg et al., Nucl. Instr. Meth. **161** (1979) 65-82.
- [3] J.B. Neumayr, S.A. Eliseev et al., NIMB **244** (2006) 489-500.
- [4] M. House et al., Nucl. Instr. Meth. B. **187** (2002) 535-547.
- [5] W. Reisdorf and M. Schaedel, Z. Phys. **A343** (1992) 47-57.
- [6] G.Audi et al., Nuclear Phys, **A729** (2003) 3-128.
- [7] Y. A. Litvinov, PhD Thesis, *Basic Nuclear Properties of Neutron-Deficient Nuclei Investigated via High Precision mass measurements in the Element Range  $36 < Z < 92$* , University of Gießen, Germany, May 2004.