

РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Б. П. Константинова

УДК 539.143

На правах рукописи

**ФЕДОРОВ**

**Дмитрий Валерьевич**

Исследование короткоживущих ядер тулия методом фотоионизационной спектроскопии в новом высокотемпературном мишенно-ионном устройстве масс-сепаратора ИРИС

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2001 г.

Работа выполнена в Петербургском институте ядерной физики  
им. Б. П. Константинова РАН.

Научные руководители:  
кандидат физико-математических наук,  
Барзах А. Е.

кандидат физико-математических наук,  
Пантелеев В. Н.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор  
Г.А. Петров,

доктор физико-математических наук, профессор,  
Ю.А. Пирогов.

Ведущая организация:  
Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций.

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2001 г. в \_\_\_\_\_ час.

На заседании диссертационного совета Д-002.71.01 при Петербургском институте ядерной  
физики им. Б. П. Константинова РАН по адресу:  
188300, г. Гатчина Ленинградской области, ПИЯФ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ПИЯФ РАН

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2001 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

*И. А. Митропольский*

### Актуальность проблемы.

В настоящее время одним из самых эффективных экспериментальных методов исследования основных состояний атомных ядер стала оптическая лазерная спектроскопия атомов. Этот метод позволяет определять спины  $I$ , магнитные дипольные  $\mu$  и электрические квадрупольные  $Q$  моменты ядер, а также изотопические изменения средних квадратов зарядовых радиусов  $\delta \langle r^2 \rangle_{A, A_0} = \langle r^2 \rangle_A - \langle r^2 \rangle_{A_0}$  для изотопов с массовыми числами  $A$  и  $A_0$ . Эти характеристики ядер извлекаются из анализа измеренных изотопических сдвигов и сверхтонкого расщепления оптических линий.

Из значений электрических квадрупольных и магнитных дипольных моментов, спинов и зарядовых радиусов можно получить довольно обширную информацию о структуре ядра.

С середины 70-х годов в крупнейших лабораториях мира используется целый ряд конкурирующих и взаимодополняющих оптических лазерных методик. Наиболее успешно применялся метод коллинеарной лазерной спектроскопии [1]. Метод оптической накачки с анализатором типа Штерна-Герлаха использовался для исследования изотопов щелочных металлов [2]. В ряде случаев эффективным оказывается флуоресцентный метод, с которого и началась история лазерной спектроскопии длинных цепочек изотопов на масс-сепараторах [3].

Эти исследования привели к обнаружению интересных эффектов и постановке ряда проблем, требующих дальнейшего изучения. В первую очередь следует упомянуть открытие необычно больших четно-нечетных колебаний в зарядовых радиусах изотопов ртути (вместо общей тенденции к росту с добавлением очередного нейтрона при движении по изотопической цепочке, наблюдалось периодическое колебание зарядового радиуса от минимальных значений у четно-нейтронных изотопов до максимальных у нечетно-нейтронных изотопов, причем размах этих колебаний был необычайно велик). Было высказано предположение, что такое поведение зарядовых радиусов объясняется сосуществованием в ядрах изотопов ртути двух состояний: близкого к сферическому и сильно деформированного [3]. Плавный ход зависимости средних квадратов зарядовых радиусов от  $N$  для Ba, Er и Yb, а также, Tb, Dy, Ho, Er и Tm [4] свидетельствует, по-видимому, о плавном изменении деформации соответствующих ядер, в отличие от скачкообразного для изотопов европия, самария, гадолиния. Характер перехода от деформированных к сферическим ядрам оказался скоррелирован с близостью заряда ядра  $Z$  соответствующей изотопической цепочки к «магическому» числу  $Z=64$ : для ядер с  $Z$ , близким к  $Z=64$ , (европий  $Z=63$ , самарий  $Z=62$ , гадолиний  $Z=64$ ) этот переход имеет скачкообразный характер, для ядер с  $Z$ , достаточно удаленным от «магического», (барий  $Z=56$ , диспрозий  $Z=66$ , гольмий  $Z=67$ , эрбий  $Z=68$ , тулий  $Z=69$  и иттербий  $Z=70$ ) переход происходит относительно плавно.

Влияние магических чисел (как протонных, так и нейтронных) на ход зависимости средних квадратов зарядовых радиусов от  $N$  вообще представляет собой интересную и далеко не до конца исследованную проблему. В частности, весьма актуально дальнейшее исследование оболочечного эффекта в зарядовых радиусах, заключающегося в резком изменении изотопической зависимости средних квадратов зарядовых радиусов при переходе числа нейтронов через магическое число [2, 5, 6].

Сопряжение ISOL (Isotope Separator On Line) – установки с лазерным комплексом для исследования

изотопических сдвигов и сверхтонкой структуры оптических линий явилось отправной точкой последующего бурного развития этой области экспериментальной физики.

Одним из самых важных узлов ISOL – системы, определяющим возможности всей установки является ее *мишенно-ионное устройство*. Именно от него зависит эффективность получения нуклидов, представляющих интерес для дальнейшего исследования. В силу этого обстоятельства, разработка мишенно-ионных устройств на ISOL–установках всегда остается актуальной задачей, которой уделяется достаточно много внимания.

В настоящее время идут активные исследования, направленные на создание высокотемпературных тугоплавких мишеней, вызванные необходимостью обеспечить более быстрое выделение нуклидов, образовавшихся в мишени, с целью увеличения выходов короткоживущих, удаленных от полосы бета - стабильности изотопов. Это могло бы открыть новые перспективы в получении и исследовании таких изотопов как  $^{11}\text{Li}$ , который имеет нейтронное гало [7, 8],  $^{73}\text{Rb}$ , который лежит на пути г-процесса и информация о скорости и модах его радиоактивного распада имеет важное значение для оценки возраста Вселенной [9], а также многих других изотопов, представляющих большой интерес как для ядерной физики, так и для астрофизики.

Активные разработки в этом направлении также вызваны необходимостью создания новых типов мишенных устройств для следующего поколения ISOL – установок, которые создаются на базе современных сильноточных ускорителей.

Например, установки ISIS (Великобритания) и TRIUMF (Канада), могут обеспечить протонный пучок с энергией протонов 500-1000 МэВ и с интенсивностью до 100 мкА [10]. Как показали специальные исследования [10, 11], поглощаемая мишенью часть энергии протонного пучка составляет 30 - 40%. Следовательно, мишенное устройство, установленное на пучке с такими параметрами, должно рассеивать мощность порядка 30-50 кВт, не разрушаясь при этом и сохраняя свои рабочие характеристики.

### **Цель работы.**

Основная цель, которую преследовала данная работа в методической части – разработав новое высокоэффективное мишенно-ионное устройство, обеспечить получение очень удаленных от полосы  $\beta$ -стабильности нейтронодефицитных нуклидов редкоземельных элементов, в количествах, достаточных для проведения лазерно-спектроскопических исследований изотопических сдвигов и сверхтонкой структуры этих изотопов на лазерно-ядерном комплексе ИРИС.

Главная цель данной работы с физической точки зрения – исследование области ядер с  $Z=69$  (тулий) в окрестности нейтронной оболочки  $N=82$  с целью получения новых данных о среднеквадратичных зарядовых радиусах, электромагнитных моментах и параметрах деформации этих нуклидов.

### **Научная новизна.**

1. Разработано новое высокотемпературное мишенно-ионное устройство с использованием вольфрамового контейнера, которое продемонстрировало высокую надежность, позволяя проводить

продолжительные on-line эксперименты при рабочей температуре до 2900 °С без заметного ухудшения основных характеристик мишени (выходов и времен полувыделения).

2. On-line исследования времен задержки и выходов изотопов лития впервые дали возможность определенно утверждать, что основным процессом, определяющим время задержки атомов щелочных металлов в мишени, является диффузия. Проведенный детальный анализ кривых полувыделения позволил дать хорошо согласующиеся с экспериментом теоретические оценки выходов изотопов лития.

3. Получены высокие значения выходов короткоживущих изотопов тулия и изотопов других элементов.

4. Впервые при использовании высокотемпературного мишенного устройства установлен эффект “банчирования” ионов. Ионы могут быть заперты в объеме мишенного устройства или вытолкнуты из него потенциалом, появляющимся на мишенном контейнере при протекании через него нагревающего тока. С использованием этого эффекта впервые были измерены времена задержки в мишени, обусловленные временем эффузии и временем пролета для атомов щелочных элементов. Непосредственным следствием обнаруженного эффекта стал новый метод запираия термоионов в мишенном устройстве потенциалом постоянного тока, нагревающего мишень.

5. Применение нового метода запираия в on-line экспериментах позволило выделять исследуемые изотопы из смеси изобар с более низкими потенциалами ионизации и увеличить селективность метода резонансной фотоионизации в лазерном мишенно-ионном устройстве.

6. Впервые измерены изотопические сдвиги и сверхтонкое расщепление для нейтронодефицитных изотопов  $^{154}\text{Tm}$ ,  $^{154\text{m}}\text{Tm}$  и  $^{153}\text{Tm}$ .

7. Получены величины изменений среднеквадратичных зарядовых радиусов и электромагнитных моментов основных и изомерного состояний удаленных от полосы  $\beta$ -стабильности изотопов тулия.

### **Практическая ценность.**

Протестированные образцы нового мишенно-ионного устройства (5 г мишенного вещества, контейнер длиной 5 см и 1 см в диаметре) при достижении рабочей температуры около 2800°С способны рассеивать мощность порядка 3 кВт. Экстраполяция позволяет утверждать, что полномасштабная, “массивная” мишень (120 – 150 г мишенного вещества, контейнер длиной 20 см и диаметром 2 см), позволит рассеивать около 30 кВт мощности, вносимой в мишенное устройство пучком бомбардирующих частиц высокой интенсивности.

Таким образом, на ИРИСе может быть создано мишенное устройство для работы на таких сильноточных установках, как ISAC, Ванкувер (Канада) и ISIS, RAL (Великобритания).

Обнаруженный эффект “банчирования” ионов является основой новых методов измерения времен задержки в мишени исследуемых нуклидов, которые определяются эффузией и временем пролета внутри мишенного контейнера.

Исследован и применен в лазерно-спектроскопических экспериментах новый метод подавления фона термоионов с помощью запирающего потенциала, обусловленного нагревающим током, текущим через мишенный контейнер. Дальнейшее применение данного метода подавления фона позволит значительно расширить круг исследуемых нуклидов. Измерения изотопических сдвигов для изотопов Tm ( $A=158 - 163$ ) с

помощью вторичного электронного умножителя в качестве детектора показали возможность успешного применения метода даже при наличии ионного тока изобар (в данном случае иттербия) на 1-2 порядка превышающего фотоионный ток исследуемого изотопа.

Полученные в работе новые данные о характеристиках основных состояний удаленных от полосы  $\beta$ -стабильности ядер тулия пополнили систематику и позволили сделать заключение об отсутствии заметных отклонений свойств данных нуклидов от свойств изотопов с тем же числом нейтронов других элементов с  $Z=56-68$ . Эти результаты имеют большое значение для исследования области ядер вблизи магического числа  $N=82$ , в частности, для выяснения вопроса о сохранении магических чисел для удаленных ядер.

### Структура, содержание и объем диссертации.

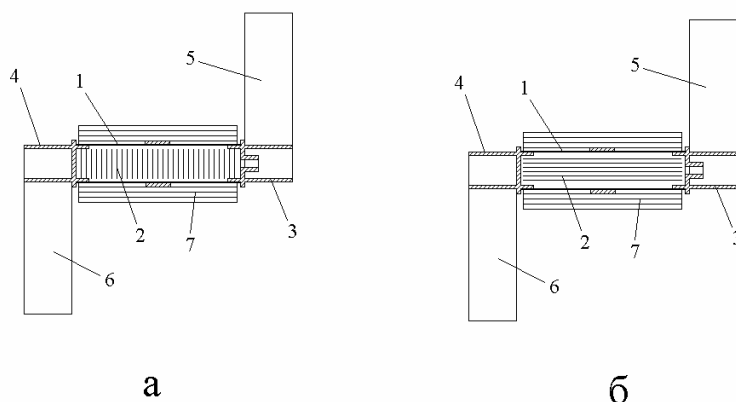
Представленная диссертация состоит из введения, двух глав, заключения и включает 12 таблиц, 44 рисунка, одно приложение и библиографию, содержащую 75 наименований. Объем диссертации 119 страниц, включая таблицы и рисунки.

Во введении представлен обзор состояния экспериментальных исследований ядер, удаленных от полосы  $\beta$ -стабильности, указаны проблемы, стоящие перед экспериментаторами, связанными с лазерной спектроскопией и ISOL-системами, изложены основные требования, предъявляемые к современным мишенно-ионным устройствам ISOL-установок.

В первой главе настоящей работы представлены результаты исследований в on-line и off-line режимах нового высокотемпературного мишенно-ионного устройства, разработанного на установке ИРИС.

Разделы 1.1 – 1.2 содержат краткое описание установки ИРИС и конструктивных особенностей нового мишенно-ионного устройства в вольфрамовом контейнере.

На рис.1 представлены варианты конструкции мишенного устройства:



**Рис. 1.** Схемы конструкции мишенного устройства.

1. Мишенный контейнер. 2. Мишенное вещество, изготовленное из танталовых и вольфрамовых фольг в виде пластинок (а) или полос (б). 3,4. Танталовые крышки. 5,6. Контакторы. 7. Термоэкран.

Раздел 1.3 представляет результаты off-line тестов нового мишенного устройства. Показано, что новое мишенное устройство механически стабильно при температуре  $2800^{\circ}\text{C}$  в течение, по крайней мере, 5 – 7

суток. Измеренная величина излучательной способности мишенного контейнера ( $\varepsilon \approx 0.6$  в широком диапазоне температур) указывает на эффективное рассеяние энергии, вносимой в мишенное устройство.

Раздел 1.4 посвящен обсуждению факторов, определяющих быстроедействие мишенного устройства (или задержку исследуемых нуклидов в мишенно-ионном устройстве). Такими факторами являются: диффузия образовавшихся нуклидов из объема мишенного вещества, десорбция (эффузия) нуклида с поверхности мишенного вещества и контейнера и время пролета частицы внутри мишенного контейнера. Описывается эффект “банчирования”, который заключается в том, что выделение из мишени происходит не равномерно по времени, а в виде периодически повторяющихся групп ионов или “банчей” (см. рис. 2). Этот эффект возникает, когда мишень нагревается переменным током, при температуре выше  $2400^{\circ}\text{C}$ . Этот эффект позволил оценить эффузионное время задержки атомов щелочных элементов (от 1 мс у лития до 6 мс у цезия).

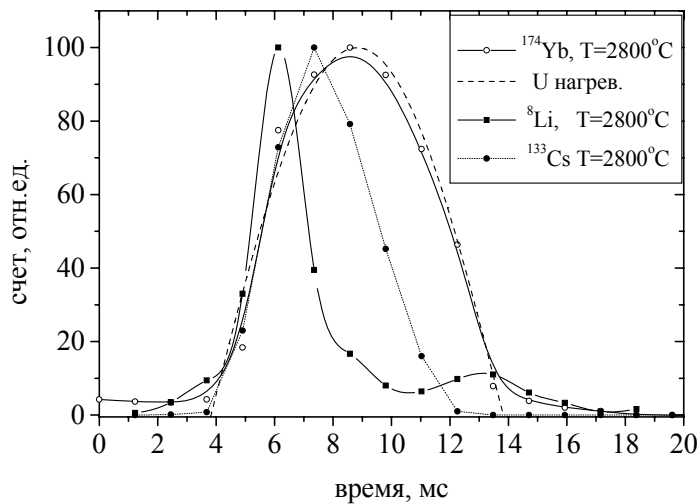
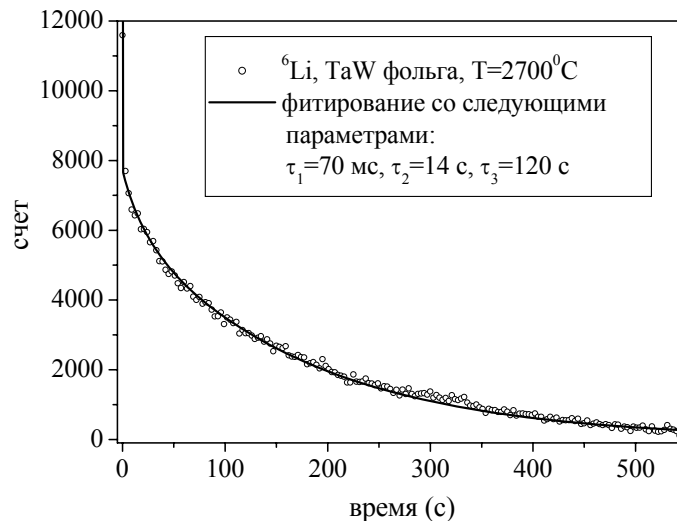


Рис. 2. Банчи изотопов  $^8\text{Li}$ ,  $^{133}\text{Cs}$  и  $^{174}\text{Yb}$ .

В разделе 1.5 представлены результаты on-line исследований новой мишени. Для изотопов лития измерены времена полувыделения и выходы из этой мишени.

Общий характер выделения изотопов лития из мишенного устройства показан на рис. 3.



**Рис. 3.** Кривая выделения радиогенного изотопа  ${}^6\text{Li}$  из мишенно-ионного устройства ИРИС.

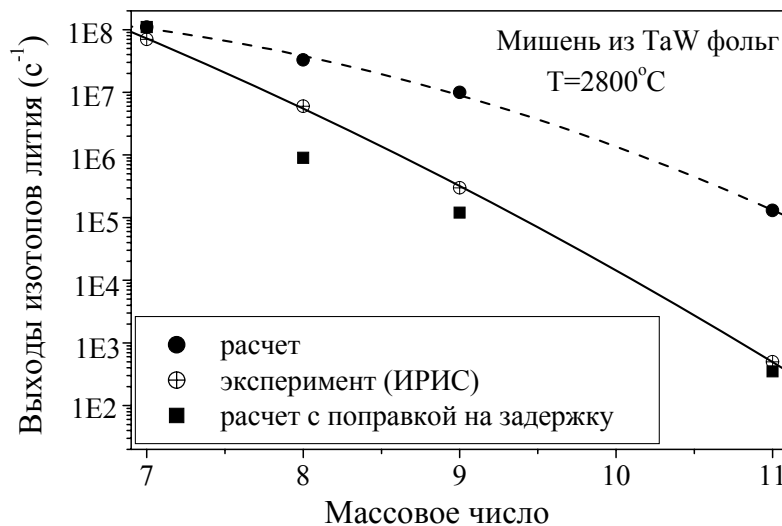
Полученные результаты позволили сделать заключение о чисто диффузионном характере выделения лития из мишени, получить диффузионные константы и температурные зависимости коэффициентов диффузии для лития, выделяющегося из тантал-вольфрамового мишенно-ионного устройства. Это дало возможность получать расчетные значения выходов изотопов лития, хорошо согласующиеся с экспериментом. Полученные значения выходов изотопов лития при температуре  $2800^\circ\text{C}$  из мишени массой  $5\text{ г}$  при интенсивности протонного пучка  $0.2\text{ мкА/см}^2$ :

Изотоп	Период полураспада мс	Выход, $\text{с}^{-1}$
${}^8\text{Li}$	840	$6 \times 10^6$
${}^9\text{Li}$	179	$3 \times 10^5$
${}^{11}\text{Li}$	8.3	$5 \times 10^2$

Анализ кривых полувыделения и значений выходов изотопов лития позволил лучше понять процессы, отвечающие за выделение этих изотопов. Учет сильной диффузионной задержки помог объяснить значительные расхождения между значениями выходов короткоживущих изотопов лития (особенно  ${}^{11}\text{Li}$ ), измеряемыми в экспериментах (ИРИС и ISOLDE), которые оказываются до  $10^3$  раз ниже ожидаемых, рассчитанных исходя из сечения образования нуклидов без учета сильной задержки (см. рис. 4).

**Рис. 4.** Выходы изотопов лития.

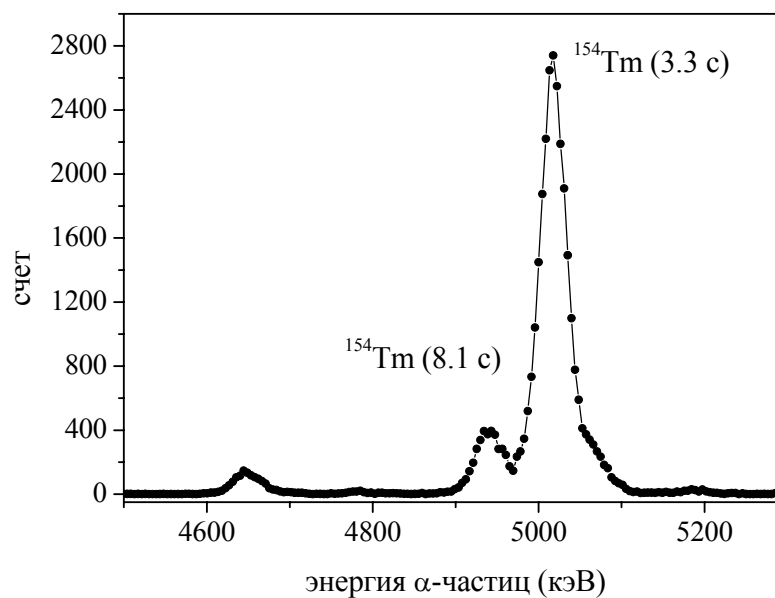
Соответствующие результаты получены и для других щелочных элементов.





В разделе 1.6 приводятся результаты on-line тестов по исследованию выходов  $\alpha$ -активных изотопов редкоземельных элементов. Пример  $\alpha$ -спектра, измеренного в ходе экспериментов показан на рис.5.

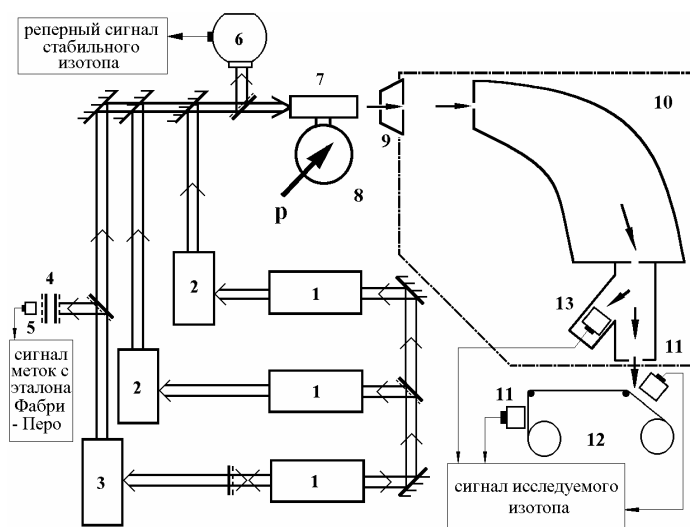
**Рис. 5.** Альфа-спектр, полученный на массовой линии  $A=154$ .



Вторая глава посвящена исследованиям изотопических сдвигов и сверхтонкой структуры нейтронодефицитных изотопов тулия на лазерно-ядерном комплексе ИРИС.

Раздел 2.1 содержит краткое описание принципов используемого метода резонансной фотоионизации.

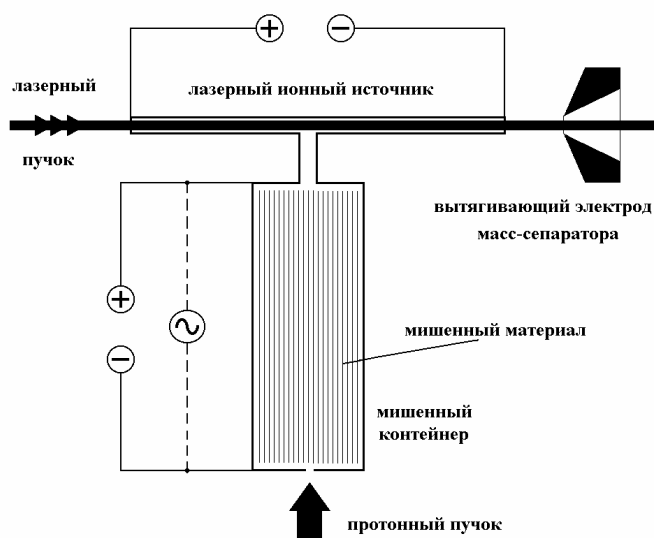
В разделах 2.2 – 2.3 описывается схема экспериментальной установки (рис. 6), метод измерений и основные требования к чувствительности и селективности, обеспечивающие успех проводимых исследований.



**Рис. 6.** Схема экспериментальной установки лазерно-ядерного комплекса ИРИС.

1. Лазеры накачки. 2. Широкополосные перестраиваемые лазеры. 3. Узкополосный сканирующий лазер. 4. Интерферометр Фабри-Перо. 5. Фотодетектор. 6. Опорная камера. 7. Лазерный ионный источник. 8. Мишенное устройство. 9. Вытягивающий электрод масс-сепаратора. 10. Масс-сепаратор. 11.  $\alpha$ -детекторы. 12. Подвижный коллектор (лентопротяжный механизм). 13. Вторичный электронный умножитель.

В разделе 2.4 содержится описание конструкции нового лазерного мишенно-ионного устройства (рис. 7).



**Рис. 7.** Мишенно-ионное устройство, использующее эффект записания ионов.

Оно позволяет значительно увеличить селективность используемого метода за счет записания фоновых тепловых ионов в объеме мишенного устройства потенциалом, возникающим на мишенном контейнере при протекании постоянного тока нагревающего мишень.

Разность потенциалов на мишени около 3 В, приложенная таким образом, чтобы ионы двигались в противоположную от ионного источника сторону, оказывается достаточной для подавления термоионного тока более, чем на порядок.

В разделе 2.5 приводятся экспериментальные результаты измерений для изотопов  $^{158-163}\text{Tm}$ ,  $^{154}\text{Tm}(I=9)$ ,  $^{154}\text{Tm}(I=2)$  и  $^{153}\text{Tm}(I=11/2)$ .

Полученные значения изотопических сдвигов и констант сверхтонкой структуры приведены в таблице:

Изотоп	$\delta\nu^{I69,A}$ , МГц	$A$ , МГц	$B$ , МГц
$^{154}\text{Tm}(I=9)$	-15520(150)	532(3)	200(500)
$^{154}\text{Tm}(I=2)$	-15150(200)	-460(10)	-600(1200)
$^{153}\text{Tm}(I=11/2)$	-16470(320)	1020(16)	-700(1300)

Разделы 2.6 – 2.8 посвящены обсуждению полученных результатов. Вычисленные значения среднеквадратичных зарядовых радиусов, магнитных дипольных и электрических квадрупольных моментов приведены в таблице:

Изотоп	$\delta\langle r^2 \rangle^{69,A}$ , фм <sup>2</sup>	$\mu_i$ , я.м.	$Q_s$ , б
<sup>154</sup> Tm(I=9)	1.522(15)	5.91(5)	-0.2(4)
<sup>154</sup> Tm(I=2)	1.486(19)	-1.14(2)	0.4(9)
<sup>153</sup> Tm(I=11/2)	1.615(31)	6.93(11)	0.5(10)

Сделан вывод о том, что полученные значения  $\delta\langle r^2 \rangle$ ,  $\mu_i$  и  $Q_s$  изотопов <sup>154</sup>Tm(I=9), <sup>154</sup>Tm(I=2) и <sup>153</sup>Tm(I=11/2) укладываются в известную систематику и не указывают на какие-либо аномалии структуры этих ядер, в отличие от соседних изотопов иттербия с тем же N. Полученные данные свидетельствуют о сохранении магического числа N=82 по крайней мере для удаленных от полосы  $\beta$  - стабильности изотопов тулия.

В заключении кратко сформулированы основные результаты настоящей работы.

### На защиту выносятся следующие результаты:

1. Разработано новое высокотемпературное мишенно-ионное устройство с использованием вольфрамового контейнера, которое позволяет проводить on-line эксперименты при рабочей температуре до 2900 °С. On-line исследования времен задержки и выходов изотопов лития впервые дали возможность определенно утверждать, что основным процессом, определяющим время задержки атомов щелочных металлов в мишени, является диффузия. Проведенный детальный анализ кривых полувыделения позволил дать хорошо согласующиеся с экспериментом теоретические оценки выходов изотопов лития.
2. Получены высокие значения выходов короткоживущих изотопов тулия и изотопов других элементов.
3. Впервые обнаружен эффект “банчирования” ионов, измерены времена задержки в мишенном устройстве, определяемые эффузией и временем пролета для щелочных элементов. На основе этого эффекта разработан метод увеличения селективности лазерного высокотемпературного мишенно-ионного устройства путем подавления фона термоионов с помощью запирающего потенциала, приложенного к контейнеру мишенного устройства.
4. Впервые измерены значения изотопических сдвигов, констант сверхтонкой структуры для изотопов <sup>154</sup>Tm(I=9), <sup>154</sup>Tm(I=2) и <sup>153</sup>Tm(I=11/2).
5. Впервые определены значения изменений среднеквадратичных зарядовых радиусов  $\delta\langle r^2 \rangle$  нуклидов <sup>154</sup>Tm(I=9), <sup>154</sup>Tm(I=2) и <sup>153</sup>Tm(I=11/2).
6. Впервые определены величины магнитных дипольных моментов  $\mu$  нуклидов <sup>154</sup>Tm(I=9), <sup>154</sup>Tm(I=2) и <sup>153</sup>Tm(I=11/2).
7. Впервые определены величины электрических квадрупольных моментов  $Q_s$  для нуклидов <sup>154</sup>Tm(I=9), <sup>154</sup>Tm(I=2) и <sup>153</sup>Tm(I=11/2).

### Апробация работы.

Результаты данной работы были представлены на следующих конференциях:

1. 5<sup>я</sup> Международная школа-семинар “Физика тяжелых ионов”. Дубна, 22-27 сентября, 1997 г.
2. Рабочее совещание по технологиям мишеней и ионных источников. ГАНИЛ, Кан, Франция, 11 - 13 июня, 1998 г.
3. 2<sup>я</sup> Международная конференция по экзотическим ядрам и атомным массам. Шанти-Крик, Белэйр, Мичиган, США, 23-27 июня, 1998 г.
4. Международная конференция по ядерной физике “50 лет ядерным оболочкам”. Дубна, 21-24 апреля, 1999 г.
5. 4<sup>е</sup> Международное рабочее совещание по лазерной спектроскопии на пучках радиоактивных ядер. Познань, Польша, 24-27 мая, 1999 г.
6. 31<sup>я</sup> Конференция Европейской группы по атомной спектроскопии. Марсель, Франция, 6-9 июля, 1999 г.
7. 1<sup>я</sup> Европейская конференция “Атомная физика на ускорителях: лазерная спектроскопия и применения”. Майнц, Германия, 19-24 сентября 1999 г.
8. 5<sup>я</sup> Международная конференция по пучкам радиоактивных ядер. Дивонн, Франция, 3-8 апреля, 2000 г.
9. 7<sup>я</sup> Международная конференция по ядерно-ядерным взаимодействиям. Страсбург, Франция, 2-7 июля, 2000 г.
10. Международный симпозиум “Перспективы в физике с радиоактивными пучками изотопов”. Хайяма, Япония, 13-16 ноября, 2000 г.

#### **Публикация полученных результатов.**

Основные результаты, представленные в диссертации опубликованы в следующих работах:

1. V. N. Pantelev, A. E. Barzakh, I. Ya. Chubukov, D. V. Fedorov, F. V. Moroz, A. G. Poljakov, S. Yu. Orlov, M. D. Seliverstov, Yu. M. Volkov, Development of the laser ion source technique for unstable nuclide atomic spectroscopy. 1994-1995 PNPI research report, Gatchina, 1996, p.75-76.
2. V. N. Pantelev, A. E. Barzakh, I. Ya. Chubukov, D. V. Fedorov, F. V. Moroz, A. G. Poljakov, S. Yu. Orlov, M. D. Seliverstov, Yu. M. Volkov, On-line investigation of a high temperature refractory target. In: 5<sup>th</sup> International School-Seminar Heavy Ion Physics. Edited by Yu.Ts. Oganessian and R. Kalpakchieva. World Scientific, Singapore, 1997, p. 736-738.
3. V. N. Pantelev, A. E. Barzakh, I. Ya. Chubukov, D. V. Fedorov, F. V. Moroz, A. G. Poljakov, S. Yu. Orlov, M. D. Seliverstov, Yu. M. Volkov, High Temperature Refractory Target of IRIS Facility, In: PNPI Research Report 1996-1997, Gatchina, 1998, p. 141-144.
4. A. E. Barzakh, I. Ya. Chubukov, D. V. Fedorov, V.N. Pantelev, M. D. Seliverstov, Yu. M. Volkov, Application of the laser ion source for isotope shift and hyperfine structure investigation. In: ENAM'98: Exotic Nuclei and Atomic Masses, edited by B.M. Sheryll, D.J. Morrissey, and C.N. Davids, 1998, AIP Woodbury, New York, p. 94-97.
5. В.Н. Пантелеев, А.Е. Барзах, Ю.М. Волков, Ф.В. Мороз, А.Г. Поляков, М.Д. Селиверстов, Д.В. Федоров, Измерения выходов и времен выделения нейтронодефицитных изотопов щелочных

- элементов из высокотемпературной мишени на установке ИРИС. Препринт ПИЯФ № 2306 NP-21-1999, 1999, Гатчина, с. 1-17.
6. А.Е. Барзах, Ю.М. Волков, В.Н. Пантелеев, М.Д. Селиверстов, Д.В. Федоров, И.Я. Чубуков, Зарядовые радиусы нейтронодефицитных изотопов тулия и иттербия вблизи оболочки  $N=82$ . Тезисы докладов конференции по ядерной физике “50 лет ядерным оболочкам” (Дубна., 21-24 апреля 1999 г), 1999, С.-Петербург, с. 90.
  7. В.Н. Пантелеев, А.Е. Барзах, Ю.М. Волков, Ф.В. Мороз, С.Ю. Орлов, А.Г. Поляков, М.Д. Селиверстов, Д.В. Федоров, И.Я. Чубуков, Исследование высокотемпературной мишени в вольфрамовом контейнере. Тезисы докладов конференции по ядерной физике “50 лет ядерным оболочкам” (Дубна., 21-24 апреля 1999 г), 1999, С.-Петербург, с. 153.
  8. A. E. Barzakh, I. Ya. Chubukov, D. V. Fedorov, V.N. Panteleev, M. D. Seliverstov, Yu. M. Volkov, Mean square charge radii of the neutron deficient rare-earth isotopes in the region of the nuclear shell  $N=82$  measured by the laser ion source spectroscopy technique. 31<sup>st</sup> European Group for Atomic Spectroscopy Conference, Marseille, France, 6-9 July, 1999, P2-47.
  9. V.N. Panteleev, A.E. Barzakh, D.V. Fedorov, F.V. Moroz, A.G. Poljakov, S.Yu. Orlov, M.D. Seliverstov, and Yu.M. Volkov, High-Selective High-Temperature Target – Laser Ion Source Unit for the Short-Lived Isotopes Production. In: Proc. of 4<sup>th</sup> International Workshop Laser Spectroscopy on Beams of Radioactive Nuclei (Poznan, Poland, May 24-27, 1999), 2000, JINR Dubna, p. 227-238.
  10. A. E. Barzakh, I. Ya. Chubukov, D. V. Fedorov, V.N. Panteleev, M. D. Seliverstov, Yu. M. Volkov, Mean square charge radii of the neutron deficient rare-earth isotopes in the region of the nuclear shell  $N=82$  measured by the laser ion source spectroscopy technique. Phys. Rev. C, 2000, V. 61, 034304, p. 1-4.
  11. V.N. Panteleev, A.E. Barzakh, D.V. Fedorov, F.V. Moroz, A.G. Poljakov, S.Yu. Orlov, M.D. Seliverstov, and Yu.M. Volkov, Selective high temperature refractory target – laser ion source unit of IRIS facility. Hyperfine Interactions, 2000, V. 127, p. 421-424.
  12. D.V. Fedorov, V.N. Panteleev, A.E. Barzakh, F.V. Moroz, A.G. Poljakov, S.Yu. Orlov, M.D. Seliverstov, and Yu.M. Volkov, Recent Developments of a High Temperature Refractory Target Unit of the IRIS Facility. 7<sup>th</sup> Nucleus-Nucleus Collisions Conference, Strasbourg, France, July 3-7, 2000.
  13. V.N. Panteleev, A.E. Barzakh, D.V. Fedorov, F.V. Moroz, A.G. Poljakov, and M.D. Seliverstov, High temperature target – laser ion source unit development for effective short lived isotope production and spectroscopic investigation. In: Abstract Book of Int. Symposium on Perspectives in Physics with Radioactive Isotope Beams, Hayama, Japan, November 13-16, 2000, p. C-42.

#### **Список литературы:**

1. Neugart R. Collinear fast-beam laser spectroscopy on radioactive isotopes in the rare-earth region. In: Lasers in Nuclear Physics. Edited by C.E. Bemis Jr. And H.K. Carter. Harwood Academic Publishers, Chur, London, New York, 1982. p. 231-256.

2. Thibault C., Touchard F., High resolution laser spectroscopy of radioactive alkali isotopes. In: Lasers in Nuclear Physics. Edited by C.E. Bemis Jr. And H.K. Carter. Harwood Academic Publishers, Chur, London, New York, 1982. p. 113-135.
3. Kluge H.-J., Laser spectroscopy of radioactive isotopes in resonance cells. In: Lasers in Nuclear Physics. Edited by C.E. Bemis Jr. And H.K. Carter. Harwood Academic Publishers, Chur, London, New York, 1982. p. 137-162.
4. G.D. Alkhazov, A.E. Barzakh, V.P. Denisov, V.S. Ivanov, I.Ya. Chubukov, V.S. Letokhov, V.I. Mishin, S.K. Sekatsky, and V.N. Fedoseyev, Electromagnetic moments and nuclear charge radii for neutron-deficient Tb isotopes and the deformation jump near  $Z=64$ ,  $N=90$ . *Z.Phys.*, 1990, A337, p. 367-370.
5. Mueller A.C., Buchinger F., Klempt W., Otten E.W., Neugart R., Ekstrom C., Heinemeier J., Spins moments and charge radii of barium isotopes in the range  $^{122-146}\text{Ba}$  determined by collinear fast-beam laser spectroscopy. *Nucl. Phys.*, 1983, A403, p. 234-262.
6. Ahmad S.A., Klempt W., Neugart R., Otten E.W., Wendt K., Ekstrom C., Determination of nuclear spins and moments in a series of radium isotopes. *Phys. Lett.*, 1983, 133B, p. 47-52.
7. I. Tanihata, H. Hamagaki, O. Hashimoto, Y. Shida, N. Yoshikawa, K. Sugimoto, O. Yamakawa, and T. Kobayashi, Measurements of Interaction Cross Sections and Nuclear Radii in the Light p-Shell Region. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, V.55, p.2676-2679.
8. I. Tanihata, Neutron Halos and Exotic Modes. *Nucl. Phys.*, 1990, A520, p. 411c-425c.
9. A. Jokinen, M. Oinonen, F. Didierjean, P. Hoff, A. Huck, A. Knipper, G. Marguier, Yu. N. Novikov, A.V. Popov, M. Ramdhane, D.M. Seliverstov, P. Van Duppen, G. Walter and the ISOLDE collaboration, Proton instability of  $^{73}\text{Rb}$ . *Z. Physik*. 1996, A355, p. 227-228.
10. J. R. J. Bennett, Targets for the production of high intensity radioactive ion beams. *Nucl. Instr. and Meth.*, 1997, B 126, p. 105-112.
11. J. R. J. Bennett, C. J. Densham, P. V. Drumm, W.R. Evans, M. Holding, G.R. Murdoch, V. Panteleev. The design and development of the RIST target. *Nucl. Instr. and Meth.*, 1997, B 126, p. 117-120.