

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ТЕСТЫ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО СЕПАРАТОРА ВАСИЛИСА (SHELIS) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСКОРЕННЫХ ИОНОВ ^{50}Ti

А. В. Еремин^{a,1}, *А. Г. Попеко*^a, *О. Н. Малышев*^a, *Б. Галл*^b,
Ж. Асфари^b, *А. Лопез-Мартенс*^c, *К. Хошильд*^c, *О. Дорво*^b,
Б. Н. Гикал^a, *С. Л. Богомолов*^a, *В. Н. Логинов*^a, *А. Е. Бондарченко*^a,
В. И. Чепигин^a, *А. И. Свирихин*^a, *А. В. Исаев*^a, *Е. А. Сокол*^a,
М. Л. Челноков^a, *А. Н. Кузнецов*^a, *А. А. Кузнецова*^a, *Ю. А. Попов*^a,
К. Резинкина^c, *Ф. Дешери*^b, *Б. Андел*², *З. Хофманн*^d,
И. Маурер^d, *С. Хайнц*^d, *Ж. Руберт*^e

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^b IPHC, IN2P3-CNRS, Страсбург, Франция

^c CSNSM, IN2P3-CNRS, Орсе, Франция

² Университет им. Я. Коменского, Братислава

^d GSI, Дармштадт, Германия

^e LPSC, Гренобль, Франция

На циклотроне У-400 с использованием ЭЦР-источника получен высокоинтенсивный пучок ионов ^{50}Ti . На модернизированном сепараторе ВАСИЛИСА (SHELIS) проведены тестовые эксперименты с использованием ускоренных ионов ^{50}Ti . Получены данные о коэффициентах трансмиссии ядер отдачи, синтезируемых в реакциях полного слияния. Полностью подтверждены ионно-оптические расчеты, заложенные в проект модернизации сепаратора.

High-intensity ion beam of ^{50}Ti ions was obtained using ECR ion source at the U400 cyclotron. The experimental tests using accelerated ^{50}Ti ions were performed with modernized VASSILISSA separator (SHELIS). Data have been obtained on the transmission coefficients of recoil nuclei synthesized in complete fusion reactions. Estimates from ion optical calculations performed in the design phase of the project of modernization of the separator are completely confirmed.

PACS: 23.60.+e; 25.70.Gh; 29.30.-h; 29.40.Gx

¹E-mail: eremin@jinr.ru

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних 15 лет в ЛЯР ОИЯИ был проведен большой цикл работ по синтезу и исследованию свойств радиоактивного распада тяжелых и сверхтяжелых (СТЭ) элементов с использованием высокоинтенсивных пучков ионов ^{48}Ca [1–3], ускоряемых на циклотроне У-400 с применением ЭЦР-источника [4, 5]. Наиболее тяжелым элементом, синтезированным с использованием пучков ^{48}Ca , был 118-й элемент, полученный в реакции полного слияния с ядрами мишени ^{249}Cf [3]. Дальнейшее продвижение в область СТЭ с большими атомными номерами требует использования пучков ускоренных ионов с большими Z , так как Cf является последним элементом, доступным в необходимых весовых количествах (порядка 12 мг) для изготовления мишеней.

Элемент с порядковым номером 120 и максимально возможным числом нейтронов можно синтезировать в следующих комбинациях налетающий ион – ядро мишени: $^{64}\text{Ni} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{302}120^*$, $^{58}\text{Fe} + ^{244}\text{Pu} \rightarrow ^{302}120^*$, $^{54}\text{Cr} + ^{248}\text{Cm} \rightarrow ^{302}120^*$ и $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Cf} \rightarrow ^{299}120^*$.

Реакции с ионами ^{64}Ni , ^{58}Fe и ^{54}Cr были изучены как в ЛЯР, так и в GSI (Дармштадт, Германия), однако были получены только верхние пределы сечения образования изотопов элемента $Z = 120$, соответственно, 0,56, 0,4 и 0,09 пб ($1 \text{ пб} = 10^{-36} \text{ см}^2$) [6–8].

Реакция $^{50}\text{Ti} + ^{249}\text{Cf} \rightarrow ^{299}120^*$ представляется наиболее перспективной, поскольку обладает наибольшей асимметрией входного канала, что должно снижать влияние квазиделения на образование составного ядра. Однако до настоящего времени серьезных попыток изучения этой реакции не предпринималось. Высокая химическая агрессивность титана при температурах, необходимых для испарения металла, не позволяла получать пучки достаточной интенсивности с использованием ЭЦР-источников, а значительная стоимость ^{50}Ti практически исключала проведение полномасштабных экспериментов с использованием РИГ-источников ионов.

Дополнительным аргументом для получения высокоинтенсивных пучков ускоренных ионов ^{50}Ti является возможность детального спектроскопического изучения свойств радиоактивного распада изотопов Rf и Db, которые в реакциях полного слияния с ядрами мишеней Pb и Bi образуются с сечениями порядка 10 нб.

В настоящей работе представлены результаты получения высокоинтенсивных пучков ^{50}Ti на циклотроне У-400 и экспериментальных тестов сепаратора SHELS с использованием ускоренных ионов ^{50}Ti в ноябре 2013 г.

УСКОРЕНИЕ ИОНОВ ТИТАНА

Для решения задачи получения ионов ^{50}Ti из ЭЦР-источника был выбран метод MIVOC (Metal Ions from Volatile Compounds) [9].

На рис. 1 представлен спектр ионов ^{50}Ti из ЭЦР-источника циклотрона У-400 после магнитного анализатора. Ток пучка ионов $^{50}\text{Ti}^{+5}$ составлял 82 мкА.

Эксперименты по получению пучка ионов Ti первоначально были проведены на стендовом ЭЦР-источнике с использованием различных металлоорганических соединений природного и обогащенного титана. Соединения титана были синтезированы в сотрудничестве с группой института IPHC (Страсбург). Наибольшие токи ионов были получены при использовании соединения $(\text{CH}_3)_5\text{C}_5\text{Ti}(\text{CH}_3)_3$.

После успешных испытаний подачи рабочего вещества с применением соединений MIVOC на стенде ионных источников на циклотроне У-400 был получен ускоренный

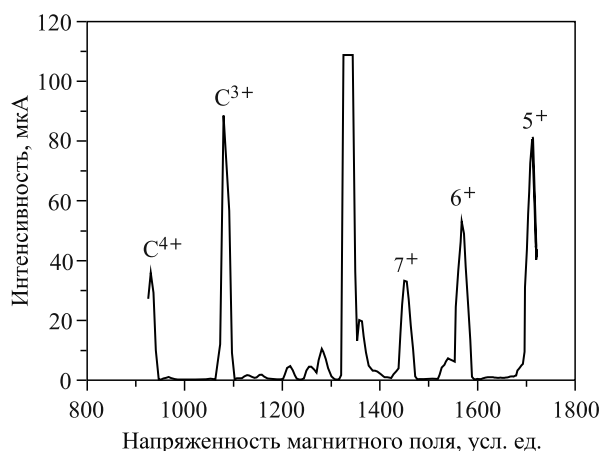


Рис. 1. Спектр ионов титана после магнитного анализатора

пучок ионов $^{50}\text{Ti}^{5+}$ для экспериментов по спектроскопии трансфермиевых элементов. Ток инжектированного пучка $^{50}\text{Ti}^{5+}$ составлял около 50 мкА, в течение трехнедельного эксперимента источник показал стабильную и надежную работу. Измеренный расход соединения составил около 2,4 мг/ч, что соответствует расходу ^{50}Ti 0,5 мг/ч.

На циклотроне У-400 для получения частиц с энергией 5–6 МэВ/нуклон могут быть ускорены ионы $^{50}\text{Ti}^{5+}$ и $^{50}\text{Ti}^{6+}$. Энергия ионов на циклотроне зависит не только от отношения массы к заряду, но и от радиуса орбиты пучка, с которой производится вывод. На У-400 система вывода основана на методе перезарядки ионов на тонкой графитовой фольге. После прохождения фольги ионы перезаряжаются и появляется спектр зарядовых состояний, в котором преобладают $^{50}\text{Ti}^{19+}$, $^{50}\text{Ti}^{20+}$, $^{50}\text{Ti}^{21+}$. Коэффициент перезарядки определяет радиус вывода, что дает дополнительную возможность регулировки энергии ионов выведенного пучка. Разброс по зарядам определяет эффективность вывода. В табл. 1 дана расчетная энергия ионов ^{50}Ti , которую можно получить на цикло-

Таблица 1. Расчетная энергия Ti и параметры системы вывода

Ускоряемый ион	Выводимый ион (процентное содержание в спектре после фольги)	E , МэВ/нукл.	$E_{\text{ион}}$, МэВ	Условия вывода
$^{50}\text{Ti}^{5+}$	$^{50}\text{Ti}^{19+}$ (35 %)	5,0	250	$R = 152$ см (двухоборотный вывод)
	$^{50}\text{Ti}^{20+}$ (35 %)	5,1	256	$R = 154$ см (двухоборотный вывод)
$^{50}\text{Ti}^{6+}$	$^{50}\text{Ti}^{20+}$ (41 %)	6,6	331	$R = 147$ см (двухоборотный вывод)
	$^{50}\text{Ti}^{21+}$ (29 %)	6,8	340	$R = 149$ см (двухоборотный вывод)
	$^{50}\text{Ti}^{19+}$ (36 %)	4,7	233	$R = 123$ см (трехоборотный вывод)
	$^{50}\text{Ti}^{20+}$ (32 %)	4,8	239	$R = 125$ см (трехоборотный вывод)

троне У-400, и параметры системы вывода: радиус выводной орбиты пучка и процентное содержание одного заряда в спектре ионов после выводной фольги.

Система вывода циклотрона позволяет в небольшом диапазоне менять энергию ионов относительно указанной в табл. 1 за счет перемещения фольги и изменения уровня магнитного поля в циклотроне.

Для эксперимента на У-400 были ускорены ионы $^{50}\text{Ti}^{5+}$. Максимальный ток пучка, полученный на мишени, составил 0,5 мкА · част.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В ноябре 2013 г. на ускорителе У-400 ЛЯР ОИЯИ были проведены тестовые эксперименты для измерения эффективности транспортировки ядер отдачи, образующихся в реакциях ускоренных ионов ^{50}Ti с мишенями ^{164}Dy и ^{208}Pb . В качестве материала для мишеней использовались Dy_2O_3 и PbS . Мишенный материал наносился методом электроосаждения слоем 0,3 и 0,36 мг/см² (по Dy и Pb соответственно) на Ti-подложку толщиной 2 мкм. Для снижения тепловой нагрузки мишени в форме сегментов устанавливались на вращающийся диск в мишенном блоке модернизированного сепаратора ВАСИЛИСА (SHELS) [10].

В фокальной плоскости сепаратора располагался двусторонний многостриповый кремниевый детектор размером 60 × 60 мм, 48 × 48 стрипов [11].

В качестве тестовых реакций использовались следующие реакции полного слияния: $^{50}\text{Ti} + ^{164}\text{Dy} \rightarrow ^{214}\text{Ra}^*$ и $^{50}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{258}\text{Rf}^*$.

На рис. 2 приведен спектр α -частиц, испускаемых при распаде изотопов, синтезируемых в реакции полного слияния $^{50}\text{Ti} + ^{164}\text{Dy} \rightarrow ^{214}\text{Ra}^*$. Полученное в ходе экспериментов разрешение фокального детектора составило 20 кэВ (для одного стрипа) при комнатной температуре детектора.

Определение эффективности транспортировки ядер отдачи чрезвычайно важно для последующего определения поперечных сечений образования ядер — остатков испаре-

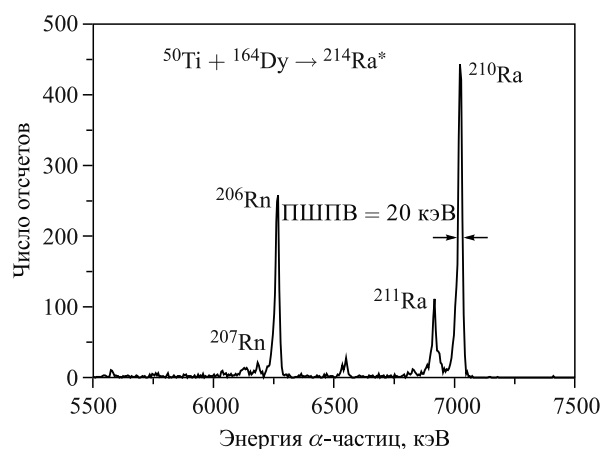


Рис. 2. Спектр α -частиц, испускаемых при распаде изотопов, синтезируемых в реакции полного слияния $^{50}\text{Ti} + ^{164}\text{Dy} \rightarrow ^{214}\text{Ra}^*$

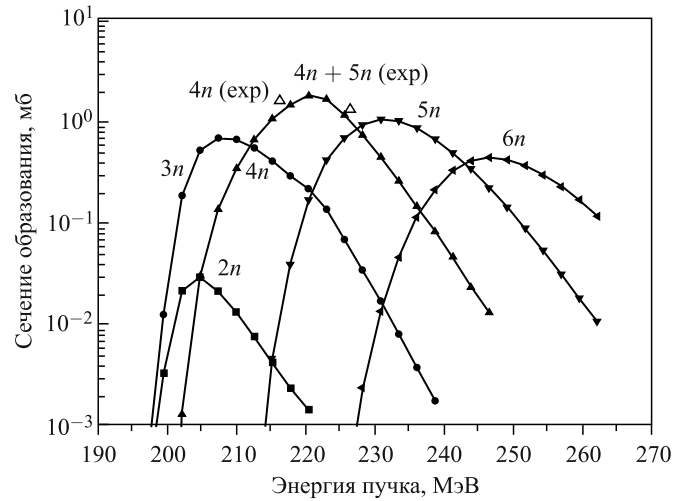


Рис. 3. Сравнение расчетных значений сечений образования изотопов Ra (темные символы) с измеренными сечениями образования для этих изотопов в реакции $^{50}\text{Ti} + ^{164}\text{Dy} \rightarrow ^{214}\text{Ra}^*$ (светлые символы) в предположении, что эффективность транспортировки ядер отдачи составляла 40 %

ния (ЯО). Для модернизированного сепаратора этот параметр может быть найден путем сравнения с экспериментальными данными, полученными ранее, или, в случае их отсутствия, с расчетными функциями возбуждения. В случае реакции $^{50}\text{Ti} + ^{164}\text{Dy} \rightarrow ^{214}\text{Ra}^*$ экспериментальные данные для сечений образования изотопов Ra отсутствуют. Сравнение измеренных выходов для этих изотопов в экспериментах 2013 г. (светлые символы) с расчетными значениями (темные символы), полученными А. В. Карповым (ЛЯР ОИЯИ) с использованием компьютерного кода NRV [12] (рис. 3), дает оценку эффективности транспортировки ЯО порядка 40 % для каналов с испарением 4–5 нейтронов.

Для реакции «холодного» слияния $^{50}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{258}\text{Rf}^*$ сечения образования ядер — остатков испарения были с большой точностью измерены в экспериментах на кинематическом сепараторе SHIP (GSI) [13]. В нашем случае точность определения энергии пучка составляет величину порядка $\pm 1,5\%$ (точность измерения + долговременная нестабильность). Это приводит к неопределенности в нахождении положения максимума функции возбуждения порядка 3 МэВ (для данного энергетического диапазона ускоренных ионов). В этом случае неточность в определении эффективности транспортировки ядер отдачи по сравнению с измеренными ранее экспериментальными данными может достигать фактора 2 или даже больше. Такая неопределенность связана с тем, что реакции «холодного» слияния имеют узкие функции возбуждения (ПШПВ порядка 5 МэВ). Изменение энергии пучка на величину 2–3 МэВ приводит к изменению сечения образования в 2–3 раза.

В реакции $^{50}\text{Ti} + ^{208}\text{Pb} \rightarrow ^{258}\text{Rf}^*$ после испарения компаунд-ядром двух нейтронов образовывался изотоп ^{256}Rf , имеющий при выбранной энергии пучка (см. табл. 2) максимум сечения образования порядка 15 нб. В основном этот изотоп испытывает спонтанное деление (вилка более 98 %). Фактор подавления рассеянных ионов пучка был достаточно высоким, что обеспечило регистрацию в фокальной плоскости сепаратора осколков спонтанного деления (SF) ^{256}Rf без примеси фоновых продуктов. Идентификация проводилась с использованием корреляций ЯО–SF. Так как период полураспада

Таблица 2. Измеренные экспериментально величины эффективности транспортировки для старого и модернизированного сепараторов, сравнение с расчетными данными

Реакция	Энергия пучка, МэВ	Толщина мишени, мг/см ²	Эффективность транспортировки ЯО		
			Старая	Новая	Расчет
$^{50}\text{Ti}(^{164}\text{Dy}, 4-5n)^{209}\text{Ra}$	240	Dy ₂ O ₃ -0,3	0,3 ¹	0,4	0,45
$^{50}\text{Ti}(^{208}\text{Pb}, 2n)^{256}\text{Rf}$	237	PbS-0,36	0,25 ²	0,2-0,4	0,4

¹ Данные приведены для реакции $^{48}\text{Ca} + ^{174}\text{Yb}$.
² Данные приведены для реакции $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$.

составляет величину 6,2 мс, вероятность случайных совпадений пренебрежимо мала.

Экспериментально измеренные величины эффективности транспортировки для старого и модернизированного сепараторов приведены в табл. 2 совместно с расчетными значениями, полученными с использованием программ для расчета параметров сепаратора [14, 15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тестовые эксперименты с использованием пучка ускоренных частиц ^{50}Ti на циклотроне У-400 показали, что можно получить и стабильно удерживать интенсивность пучка на мишени порядка $4 \cdot 10^{12}$ част. В дальнейшем имеется возможность увеличить это значение в два раза. Полученные данные позволяют сделать вывод, что параметры модернизированного сепаратора ВАСИЛИСА (в новой редакции SHELS), достигнутые в процессе реконструкции, в полной мере соответствуют проектным.

Обеспечиваемая сепаратором эффективность трансмиссии ЯО, синтезируемых в реакциях с ионами ^{50}Ti , высокая интенсивность пучка ускоренных ионов и высокий коэффициент очистки от рассеянных ионов дают возможность набора достаточной статистики за относительно короткое время, что позволит приступить к детальному изучению структуры изотопов Rf и Db. В частности, проводить эксперименты по исследованию спонтанного деления изотопов этих элементов с использованием в фокальной плоскости сепаратора нейронного детектора [16]. Эти данные представляют исключительный интерес для оценок свойств изотопов сверхтяжелых элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 13-02-12003, № 14-02-91051, № 14-02-93962) и Французского национального агентства исследований (гранты ANR-06-BLAN-0034-01 и ANR-12-BS05-0013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oganessian Yu. Ts. et al.* Investigation of the $^{243}\text{Am} + ^{48}\text{Ca}$ Reaction Products Previously Observed in the Experiments on Elements 113, 115, and 117 // *Phys. Rev. C*. 2013. V. 87. P. 014302-1–014302-10.
2. *Oganessian Yu. Ts. et al.* Experimental Studies of the $^{249}\text{Bk} + ^{48}\text{Ca}$ Reaction Including Decay Properties and Excitation Function for Isotopes of Element 117, and Discovery of the New Isotope ^{277}Mt // *Ibid.* P. 054621-1–054621-10.

3. *Oganessian Yu. Ts.* Heaviest Nuclei from ^{48}Ca -induced Reactions // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2007. V. 34. P. R165–R242.
4. *Kutner V. B. et al.* Production of Intense ^{48}Ca Ion beam at the U-400 Cyclotron // Rev. Sci. Instr. 2000. V. 71, No. 2. P. 860–862.
5. *Vogomolov S. et al.* Recent Development in ECR Sources at FLNR JINR // Proc. of RUPAC2012, Saint-Petersburg, Russia, Sept. 24–28, 2012. FRYOR01; <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/rupac2012/html/author.htm>.
6. *Hofmann S. et al.* Attempts for the Synthesis of New Elements at SHIP // GSI Sci. Report. 2011. P. 205.
7. *Oganessian Yu. Ts. et al.* Attempt to Produce Element 120 in the $^{244}\text{Pu} + ^{58}\text{Fe}$ Reaction // Phys. Rev. C. 2009. V. 79. P. 024603-1–024603–4.
8. *Hofmann S. et al.* Probing Shell Effects at $Z = 120$ and $N = 184$ // GSI Sci. Report. 2008. P. 131.
9. *Koivisto H. et al.* Production of Titanium Ion Beams in an ECR Ion Source // Nucl. Instr. Meth. B. 2002. V. 187. P. 111–116.
10. *Еремин А. В. и др.* Первые экспериментальные тесты модернизированного сепаратора ВАСИЛИСА // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12, № 1(192). С. 63–73.
11. *Исаев А. В. и др.* Первое применение двухстороннего многострипового Si-детектора в проекте GABRIELA // ПТЭ. 2011. Т. 1. С. 43–48.
12. *Karpov A. V. et al.* Statistical Model Code of NRV. <http://nrv.jinr.ru/>.
13. *Hofman S. et al.* Production and Decay of $^{269}110$ // Z. Phys. A. 1995. V. 350. P. 277–280.
14. *Popeko A. G. et al.* Monte-Carlo Simulation of Ion Trajectories in Kinematic Recoil Separator VASSILISSA // Nucl. Instr. Meth. B. 1997. V. 126. P. 294–296.
15. GICOSY Ion Optics Program. <http://www-linux.gsi.de/~weick/gicosy/>.
16. *Свирихин А. И. и др.* Детектор для изучения характеристик спонтанного деления короткоживущих тяжелых ядер // ПТЭ. 2011. № 5. С. 50–54.

Получено 8 июля 2014 г.