

**СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА**

P9-92-431

**С.М.Бийский, А.В.Мажулин, В.Е.Миронов,  
В.Н.Разувакин, В.П.Саранцев, А.П.Сумбаев,  
А.А.Фатеев, В.С.Швецов, Г.Д.Ширков**

**ЭЛЕКТРОННО-КОЛЬЦЕВОЙ ИОНИЗАТОР ERIS**

Создание электронно-кольцевого ионизатора (Electron Ring Ion Source) ERIS было начато в ОИЯИ в 1991г. [1 - 3]. Целью создания ERIS являются исследования по физике электронных оболочек многозарядных ионов.

В настоящее время имеется большое количество расчетных данных для ионизированных атомов (в частности, энергии характеристических линий и их сдвиги в зависимости от степени ионизации), полученных на базе различных физических моделей [4]. Наиболее полно структура и свойства электронных оболочек описываются для легких ионов. Однако с ростом заряда ядра полнота и точность расчетов значительно снижаются. Учет релятивистских эффектов, а также учет процессов типа Оже и Костера-Кронига в различных моделях дают отличающиеся друг от друга результаты. Измерение спектров и абсолютных выходов излучения возбужденных и ионизированных атомов, сечений ионизации, сравнение экспериментальных и расчетных параметров позволит выявить ограничения и область применимости тех или иных моделей в широком диапазоне элементов таблицы Менделеева и получить новую информацию о строении электронных оболочек многозарядных ионов.

В качестве источника высокозарядных ионов на установке ERIS предполагается использование электронных колец с параметрами:

число электронов -  $N_e \sim 5 \times 10^{12}$ ,

большой радиус -  $R \sim 1.8 \div 2.2$  см,

малые радиусы (среднеквадратичные) -  $a_{r,z} \sim 1.0$  мм,

релятивистский фактор азимутального вращения электронов -  $\gamma \geq 10$ ,

длительность существования кольца от начала формирования -  $\sim 60 \div 100$  мс, в том числе на малых радиусах  $\sim 40 \div 80$  мс.

Загрузка объема кольца дозированными порциями нейтралов исследуемого элемента позволит путем последовательной ионизации электронным ударом получать и накапливать в кольце ионы высоких зарядностей от  $\text{Xe}^{30+}$  до  $\text{Xe}^{50+}$  и от  $\text{U}^{44+}$  до  $\text{U}^{82+}$  количеством до  $10^{10}$  ионов в цикле. Решающим преимуществом создаваемой установки, как источника многозарядных ионов

качественно нового типа, в сравнении с существующими источниками, являются относительно высокая интенсивность многозарядных ионов (до  $10^{10}$  в цикле) практически любого элемента периодической таблицы, а также возможность исследования временного развития процессов в течение всего времени удержания и ионизации высокозарядных ионов. После оснащения ERIS кристалл-дифракционным спектрометром высокого разрешения может быть создан исследовательский комплекс для изучения глубокоионизированных состояний ионов.

На рис.1 изображен расчетный выход ионов Xe из ERIS в сравнении с источниками многозарядных ионов ECR и EBIS [3].

Установка ERIS создается на базе линейно - индукционного ускорителя электронов СИЛУНД-20 и компрессора (адгезатора) электронных колец КУТИ - 20, часть систем которого реконструируется.

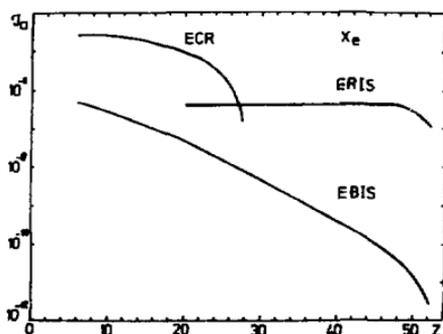


Рис.1. Сравнительные зависимости выхода ионов Xe от зарядности для электронно-кольцевого источника ионов (ERIS), источника ионов на электронно-циклотронном резонансе (ECRIS) и электронно-лучевого источника (EBIS)

На рис.2 изображена вакуумная камера и магнитная система адгезатора ERIS после реконструкции.

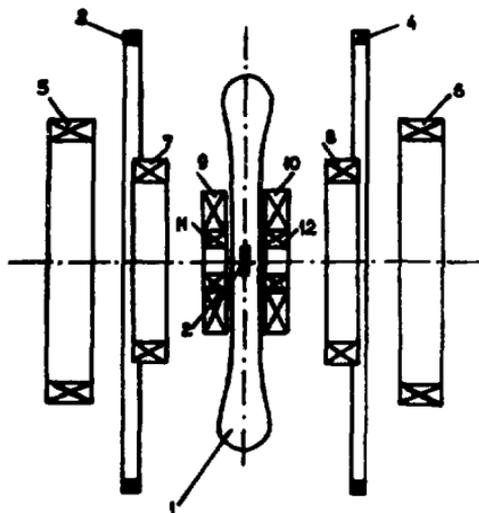


Рис. 2. Магнитная система адгезатора (компрессора) ERIS: 1 - вакуумная камера; 2 - электронное кольцо; 3, 4 - катушки "0" ступени; 5, 6 - катушки I ступени сжатия; 7, 8 - катушки II ступени сжатия; 9, 10 - катушки III ступени сжатия; 11, 12 - катушки IV ступени дополнительного сжатия и длительного удержания электронного кольца

Для длительного удержания электронных колец на малых радиусах необходимо создание магнитных полей, медленно изменяющихся в течение нескольких десятков миллисекунд. Одним из простых и проверенных способов получения таких полей в магнитной системе адгезатора коллективного ускорителя является шунтирование токовых катушек последних ступеней сжатия в момент достижения в них максимального значения тока [5], в результате чего ток, а следовательно, и магнитное поле, удерживающее кольцо, начинают экспоненциально уменьшаться  $\sim e^{-t/\tau_c}$  с постоянной времени  $\tau_c \approx L_c / R_c$ , где  $R_c$  - активное сопротивление катушек, а  $L_c$  - их индуктивность.

Сжатое электронное кольцо релятивистских электронов является мощным источником синхротронного излучения (СИ). Потери энергии на СИ уменьшают радиус равновесной орбиты электронов и препятствуют разжатию кольца в уменьшающемся магнитном поле. При удачном выборе параметров радиус электронного кольца остается практически неизменным в течение нескольких десятков миллисекунд.

Подобное техническое решение было реализовано в экспериментах по длительному удержанию колец на коллективном ускорителе. Время жизни электронного кольца на радиусах  $R \sim 4$  см составляло  $\tau \approx 30 \div 40$  мс без разрушения и заметного увеличения малых размеров. Фактор ионизации  $j\tau$  достигал значений  $\sim 0.5 \times 10^{21} \text{см}^{-2}$  [6,7].

В установке ERIS предполагается уменьшить конечный радиус кольца путем комбинации этапов сжатия и удержания. На рис.3а представлены диаграммы токов в катушках магнитной системы в течение подобного цикла. За основу магнитной системы в данном варианте взята модифицированная магнитная система адгезатора КУТИ-20 [8], дополненная катушками IV ступени дополнительного сжатия и длительного удержания /6,7/, формирующими магнитное поле с показателем спада  $n \approx 0.5$  до радиуса кольца  $R \geq 4$  см. Эти катушки отмечены цифрами 11 и 12 на рис.2.

Стандартный цикл сжатия в магнитном поле с  $n \approx 0.5$  длится около 4 мс, при этом достигается радиус кольца 4.5 см. После достижения максимумов токов в катушках начинается первый цикл удержания кольца с ионами. Радиус кольца, излучающего СИ, в течение  $\approx 15$  мс остается в пределах  $4 \div 4.5$  см, а обобщенный момент уменьшается примерно в 1.7 раза. Показатель спада поля поддерживается на уровне  $0.5 \geq n \geq 0.45$ . Это увеличивает скорость уменьшения обобщенного момента кольца вдвое и препятствует возникновению электронно-ионных неустойчивостей.

Во втором цикле сжатия, запитывая катушки III и IV ступеней сжатия еще одним импульсом тока, увеличивают тем самым магнитное поле до 3 Тл. В результате радиус кольца уменьшается до  $R \sim 2.5$  см и начинается основной цикл

удержания длительностью  $\sim 60$  мс. В этом цикле радиус кольца меняется в пределах  $1.8 \div 2.5$  см, показатель спада  $n \sim 0.05 \div 0.1$ , а обобщенный момент уменьшается еще в 8 раз. Согласно расчетам, загрузка кольца многозарядными ионами к этому времени делает его устойчивым к возникновению неустойчивостей.

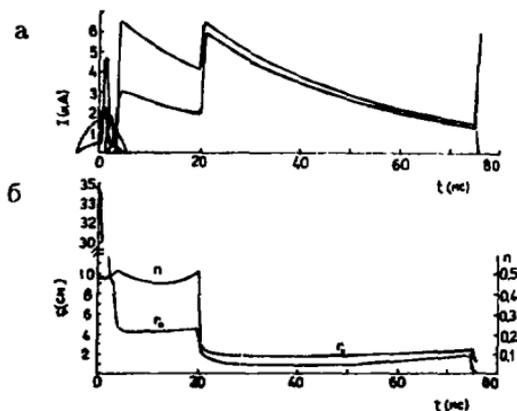


Рис.3а. Зависимости от времени токов в III и IV ступенях магнитной системы ERIS при длительном удержании электронного кольца

Рис.3б. Зависимости от времени показателя спада  $n$  на радиусе электронного кольца  $R$  при длительном удержании электронного кольца

На рис. 3б показано расчетное изменение во времени показателя спада магнитного поля  $n$  и радиуса  $R$  в течение всего времени жизни кольца в ERIS. На рис.4 представлены результаты расчетов изменения во времени среднего заряда ионов азота, аргона, криптона и ксенона при накоплении в электронном кольце и фактора ионизации  $j\tau$ . Фактор ионизации здесь достигает значения  $j\tau = 0.5 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$ .

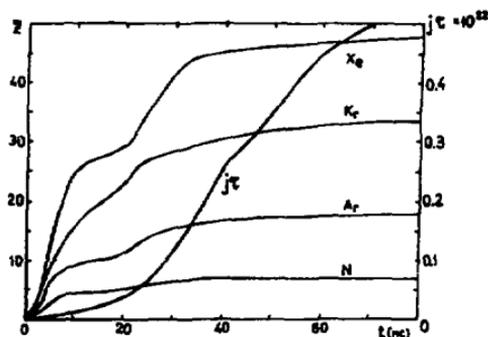


Рис. 4. Зависимости от времени фактора ионизации  $j\tau$  и среднего заряда  $Z$  ионов азота, аргона, криптона при длительном удержании электронного кольца в ERIS

Далее, в принципе, возможен и третий цикл сжатия и удержания электронного кольца с уменьшенным в 10–15 раз по сравнению с начальным значением обобщенным моментом. Третий цикл может быть начат примерно через 60 – 70 мс от момента инъекции электронного пучка в камеру компрессора. В этом цикле радиус может уменьшиться еще до значений  $1.2 \div 1.3$  см, а суммарное удержание увеличится до  $\sim 100$  мс, что позволит довести значение  $j\tau$  до  $10^{22} \text{ см}^{-2}$ . Этого будет достаточно для получения ионов  $\text{U}^{82+}$ ,  $\text{Xe}^{50+}$ ,  $\text{Kr}^{35+}$ . Тех же результатов можно добиться, увеличив время затухания токов в катушках  $\tau_c$  до 50 мс. Спектрометрия характеристического рентгеновского излучения многозарядных ионов предполагает изучение характеристик спектров, а также абсолютных и относительных выходов отдельных линий излучения, возникающего при заполнении вакансий внутренних электронных оболочек. Эффективность подобных исследований определяется характеристиками регистрирующей аппаратуры и необходимостью набора статистики, обеспечивающей требуемую статистическую точность измерений в реальные сроки работы установки. Особенно перспективным для этих целей представляется

применение кристалл-дифракционного метода спектрометрии рентгеновского излучения как обладающего более высокой (по сравнению с полупроводниковыми детекторами) разрешающей способностью [9].

В ОИЯИ совместно с Техническим Университетом г. Дрездена накоплен опыт разработки и создания кристалл-дифракционного спектрометра (КДС) высокого разрешения типа Брэгга с точностью измерений  $\sim 1$  эВ при энергии излучения  $\sim 10$  кэВ и относительным энергетическим разрешением  $\Delta E_x / E_x \leq 2 \times 10^{-5}$  для диапазона энергий  $E_x = 3 - 50$  кэВ.

Численные расчеты показывают, что для идентификации пиков отдельных линий в спектре излучения с точностью 2 % требуется набор статистики в  $10^5$  событий. Для обеспечения корректных измерений необходима работа установки с частотой циклов  $\sim 1.0$  Гц в течение  $\sim 10-30$  часов. Предполагаемое использование в КДС позиционно чувствительного детектора позволит в несколько раз ускорить набор статистики.

Помимо решения основных задач, установка ERIS может быть использована для решения ряда специфических задач:

- исследования возможности повышения эффективности коллективного ускорения ионов электронными кольцами. Постановка подобных задач для КУТИ является традиционной.

- исследования с использованием синхротронного излучения электронного кольца в диапазоне длин волн от 1 мкм до 100 мкм.

В 1991-1992 гг. был в основном завершен начальный этап реконструкции КУТИ в установку ERIS. Был сконструирован и изготовлен новый вариант магнитной системы сжатия (рис. 2), начата его отладка, и проведена опытная регистрация рентгеновского излучения в первом цикле удержания электронного кольца.

На рис. 5 и 6 показаны зарегистрированные полупроводниковым спектрометром спектры излучения линий  $K_\alpha$  и  $K_\beta$  ионов Kr и Xe из электронного кольца с радиусом  $R = 4.5 \div 5$  см в течение времени удержания  $30 \div 40$  мс. Для калибровки на рис. 6 приведены линии  $L_{\beta 2}$ ,  $L_{\beta 10}$  и  $L_{\gamma 1}$  атомов  $^{237}_{93}\text{Np}$ , возникающих при  $\alpha$ -распаде стандартного радиоактивного источника  $^{241}_{95}\text{Am}$ .

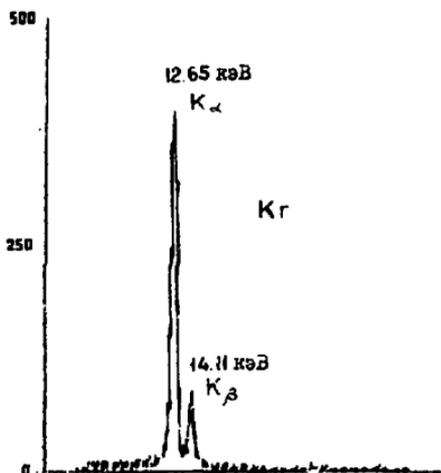


Рис.5. Спектры линий  $K_{\alpha}$  и  $K_{\beta}$  характеристического рентгеновского излучения криптона в электронном кольце ERIS

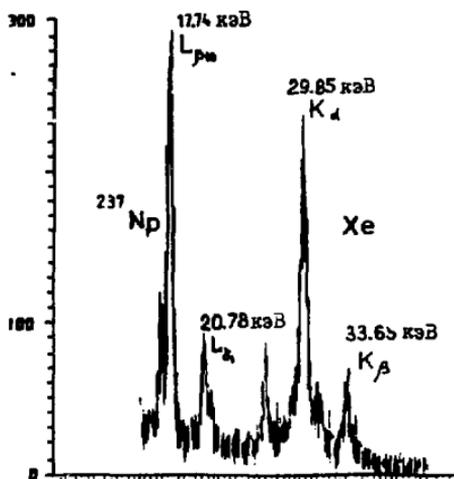


Рис.6. Спектры линий  $K_{\alpha}$  и  $K_{\beta}$  характеристического рентгеновского излучения ксенона в электронном кольце ERIS и линий  $L_{\beta 2}$ ,  $L_{\beta 10}$ ,  $L_{\gamma 1}$  атомов  $^{237}_{93}\text{Np}$ , возникающих при  $\alpha$ -распаде стандартного радиоактивного источника  $^{241}_{95}\text{Am}$

В случае успешного завершения работ по проекту ERIS создание источника высокозарядных ионов нового типа будет важным шагом в развитии источников многозарядных ионов. ERIS сможет сочетать высокие зарядности EBIS с высокой интенсивностью ECRIS (рис.1) и заполнит существующий пробел в параметрах источников многозарядных ионов.

## Л и т е р а т у р а

1. Э.А.Перельштейн, Г.Д.Ширков. Препринт ОИЯИ Е9-85-4, Дубна, 1985.

2. Г.Д.Ширков. Труды II семинара молодых ученых ОИЯИ в области экспериментальной физики. ОИЯИ P15-85-862, Дубна, 1985, с.22.

3. E.A.Perelstein, G.D.Shirkov. Preprint JINR E9-88-238, JINR, Dubna, 1988; in: Proc. of 14th Summer School and Int. Symposium on the Physics of Ionized Gases, Sarajevo, Yugoslavia, 1988, p.148.

4. G.Zschornack, G.Musiol, W.Wagner. Report Rossendorf Zfk-574, Dresden, 1986.

5. В.Г.Новиков, Э.А.Перельштейн. Авторское свидетельство СССР N 766384 (06.03.1979), Бюлл. ОИ 4, Москва, 1983.

6. И.В.Кузнецов, Э.А.Перельштейн и др. Краткие сообщения ОИЯИ, №16-86, с.33, Дубна, 1986.

7. Н.И.Азорский и др. Сообщение ОИЯИ, 9-88-224, Дубна, 1988.

8. В.С.Александров и др. Сообщение ОИЯИ, P9-88-336, Дубна, 1988.

9. Г.Щорнак и др. ЭЧАЯ, 1990, т.21, вып.4, с.1000.

Рукопись поступила в издательский отдел  
23 октября 1992 года.

Представлен проект создания в ОИЯИ электронно-кольцевого ионизатора ERIS (Electron Ring Ion Source). Установка ERIS создается на базе ускорителя электронов СИЛУНД - 20 и адгезатора (компрессора) КУТИ - 20, часть систем которого была реконструирована с целью уменьшения конечного радиуса электронного кольца до 2 см и увеличения времени жизни кольца до  $60 + 100$  мс. Ионизатор ERIS предназначен для исследований электронных оболочек высокозарядных ионов методами рентгеновской спектроскопии. Он оснащен компактным кристалл-дифракционным спектрометром высокого разрешения. Согласно расчетам в электронных кольцах ERIS может быть обеспечен фактор ионизации  $j\tau = 0.5 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$  и получены ионы высоких зарядовых состояний ( $\text{Xe}^{40+}$ ,  $\text{Kr}^{34+}$ ) в количестве до  $10^{10}$  ионов в кольце. В работе приведены результаты реализации первого этапа проекта и спектры излучения линий  $K_{\alpha}$  и  $K_{\beta}$  ионов Kr и Xe из электронного кольца.

Работа выполнена в Лаборатории сверхвысоких энергий ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1992

Перевод авторов

Bijskij S.M. et al.  
Electron Ring Ionizer ERIS

P9-92-431

A project of Electron Ring Ionizer ERIS (Electron Ring Ion Source) in JINR is submitted. The electron accelerator SILUND-20 and the adgezator (compressor) KUTI-20 after reconstruction have been taken as a basis to create ERIS setup. Some designs of the adgezator were reconstructed to reduce the ring radius up to 2cm and increase the electron ring time confinement till 60+100ms. The ERIS ionizer is supposed to investigate the electron shells of highly charged ions with X-ray spectroscopy methods. It is equipped with a compact crystal diffraction spectrometer of high resolution. According to the calculation it is possible to ensure the ionization factor  $j\tau = 0.5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$  in the ERIS electron rings and obtain the high charge states of ions ( $\text{Xe}^{40+}$ ,  $\text{Kr}^{34+}$ ) with a number up to  $10^{10}$  ions in one ring. The results of the first stage of this project and spectra of  $K_{\alpha}$  and  $K_{\beta}$  X-rays of Kr and Xe ions from electron rings are presented in this communication.

The investigation has been performed at the Particle Physics Laboratory, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1992

18 коп .

Редактор Е.В.Калинникова. Макет Н.А.Киселевой.

Подписано в печать 04.11.92.

Формат 60x90/16. Офсетная печать. Уч.-изд.листов 0,6.

Тираж 320. Заказ 45805.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.  
Дубна Московской области.