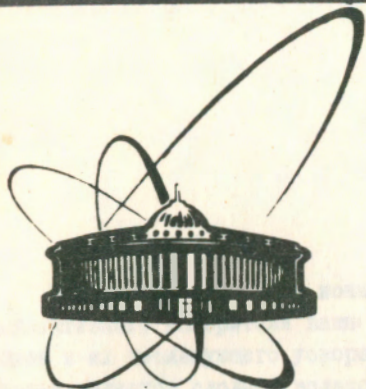


90-13



объединенный  
институт  
ядерных  
исследований  
дубна

Т 986

9-90-13

С.И.Тютюнников, В.Н.Шаляпин, А.С.Щеулин,  
А.П.Сумбаев

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОННО-ИОННЫХ КОЛЕЦ  
В ОБЛАСТИ ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТА

Направлено в "Журнал технической физики"

1990

Измерение параметров ионной компоненты электронно-ионных колец коллективного ускорителя важно для понимания процессов накопления ионов и их последующего ускорения электронным кольцом. Методически задача является сложной вследствие существенно меньших плотностей электронной и ионной компонент по сравнению с типичными плазменными объектами. При этом для изучения динамики накопления ионов необходимы методы неразрушающего контроля параметров ионной компоненты. К настоящему времени развиты методы контроля общего ионного заряда в кольце по уширению конуса синхротронного излучения электронов <sup>/1/</sup> либо по тормозному излучению электронов в поле ионов <sup>/2/</sup>. В настоящей работе используется методика измерения параметров ионов по излучению ионной компонентой электронно-ионного кольца в диапазоне длин волн вакуумного ультрафиолета (ВУФ).

### I. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Расчеты накопления ионов в электронно-ионных кольцах показывают <sup>/3/</sup>, что для типичных параметров электронных колец коллективного ускорителя: число электронов  $N_e \approx 3 \cdot 10^{12}$ , размеры малого сечения  $a_{z,r} \approx 3$  мм (полуразмер на полувывоте интенсивности), большой радиус кольца  $R_k = 4$  см — максимальный заряд ионов в конце цикла сжатия длительностью  $\sim 4$  мс находится на уровне  $z/2$ , где  $z$  — заряд ядра иона. Основная мощность излучения таких ионов, возбуждаемых в процессе электронно-ионных столкновений, лежит в ВУФ-диапазоне длин волн ( $\lambda = 100-2000 \text{ \AA}$ ). Считая основным механизмом возбуждения неупругое столкновение иона с релятивистским электроном с сечением  $\sigma \approx 10^{-20} \text{ см}^2$ , получим оценку мощности излучения:

$$P = \sigma n_e n_i c V_k = 10^{-20} \cdot 10^{12} \cdot 10^{11} \cdot 3 \cdot 10^{10} \cdot 5 \frac{\text{фот}}{\text{сек}} = 10^{13} \frac{\text{фот}}{\text{сек}} \approx$$

$\approx 10$  мВт, где  $n_e$  — плотность электронов,  
 $n_i$  — плотность ионов в электронно-ионном кольце,  
 $c$  — скорость света,  
 $V_k$  — объем кольца.

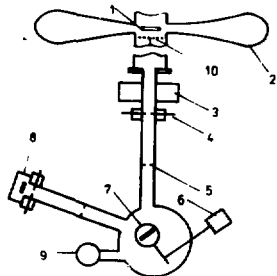


Рис.1. Схема установки:

1 - электронно-ионное кольцо, 2 - камера адгезатора, 3 - азотная ловушка, 4 - щель монохроматора, 5 - диафрагма, 6 - механизм регулировки угла поворота решетки, 7 - дифракционная решетка с поворотным столиком, 8 - детектор МКП, 9 - цеолитовый насос, 10 - коллектор.

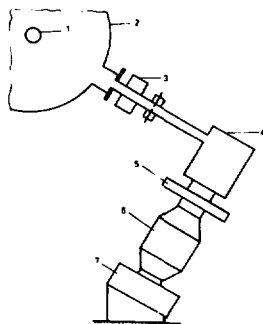


Рис.2. Схема монохроматора:

1 - электронно-ионное кольцо, 2 - камера адгезатора, 3 - азотная ловушка, 4 - камера монохроматора, 5 - шибер, 6 - азотная ловушка, 7 - магниторазрядный насос.

Для измерения столь низких мощностей необходима светосильная и чувствительная аппаратура. Следует отметить, что исследование спектра излучения ионов в широком диапазоне длин волн может дать информацию о плотности ионов в кольце, их заряде и распределении по зарядностям и типам ионов, о величине электрического поля кольца.

Аппаратура для измерения спектров ВУФ состояла из вакуумного монохроматора, построенного по схеме Сейя-Намикоа (рис.1,2). Диспергирующим и фокусирующим элементом являлась отражательная дифракционная решетка 1200 штрихов/мм радиусом кривизны  $R = 500$  мм с покрытиями из  $Al:W$  и  $Al:MgF_2$ . Рабочий диапазон длин волн  $100 \text{ \AA} < \lambda < 2000 \text{ \AA}$ . Монохроматор снабжен устройством поворота решетки без ухудшения вакуума с точностью установки длины волны  $\Delta \lambda = \pm 1 \text{ \AA}$ . Диапазон изменения ширины входной и выходной щелей  $\Delta b = 0,01 \pm 20$  мм. Система вакуумной откачки безмасляная, она состоит из цеолитового, магниторазрядного типа НЭМ-100 насосов и азотной ловушки емкостью 10 л. Система обеспечивает вакуум в монохроматоре на уровне  $P = 10^{-8}$  Тор без прогрева объема, включающего узел решетки.

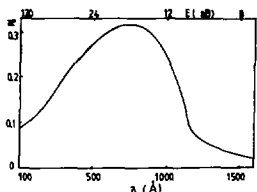


Рис.3. Спектральная чувствительность детектора МКП -  $\alpha$ .

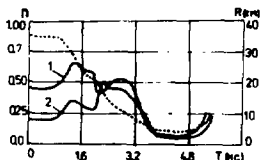


Рис.4.  $n$ -траектории (сплошная линия) и  $R$ -траектории (пунктирная линия) режимов сжатия электронно-ионных колец.

интегрального спектра ВУЛ. Коэффициент усиления составлял  $10^7 + 10^8$ , что позволяло регистрировать поток излучения фотонов на уровне  $10^5 \frac{\text{фот}}{\text{сек}}$  в токовом режиме по осциллографу.

## П. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты проводились в режиме сжатия электронно-ионных колец на установке КУТИ-20 по схемам, описанным в работах [4,5]. В схеме короткого сжатия кольцо сжималось в течение  $\approx 4$  мс от радиуса  $R_k = 35$  см до  $R_k = 4$  см, в схеме длительного удержания кольцо существовало  $\approx 25$  мс на радиусе  $R_k = 8$  см.  $n$ -траектория в схеме короткого сжатия, т.е. зависимость показателя спада магнитного поля  $n = \frac{R}{R_0} \cdot \frac{\partial B_z}{\partial r}$  от времени в течение сжатия кольца, показана на рис.4. Относительное число электронов контролировалось по мощности вспышки тормозного излучения при разжатии кольца и высадке его на стенку камеры адгезатора. Детектором являлся фотоэлектронный умножитель (ФЭУ-30) с пластиковым сцинтиллятором. Давление в камере адгезатора изменялось от  $P = 10^{-8}$  Тор до  $P = 10^{-6}$  Тор с помощью нагнетателя. На рис.5 представлены типичные сигналы с датчика в двух режимах сжатия в схеме установки рис.2. Кривая в виде полусинусоиды соответствует импульсу тока последней ступени сжатия кольца до ра-

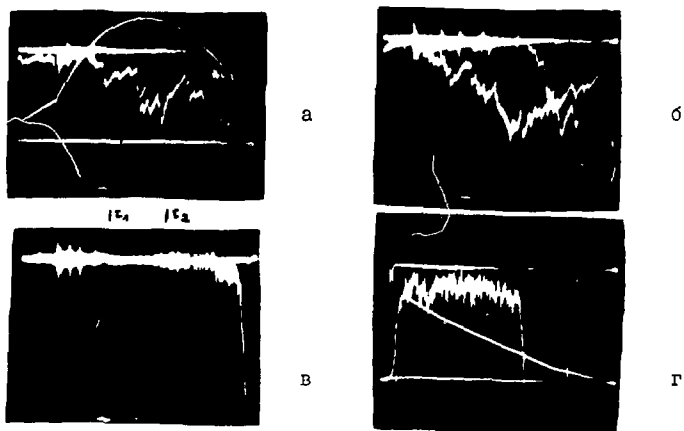


Рис.5. Осциллограммы сигналов с датчика МКП с монохроматором:  
 а, б) режим короткого сжатия без фильтров, 200 мкс/дел;  
 в) режим короткого сжатия с фильтром из лавсана;  
 г) режим длительного удержания, 5 мс/дел.

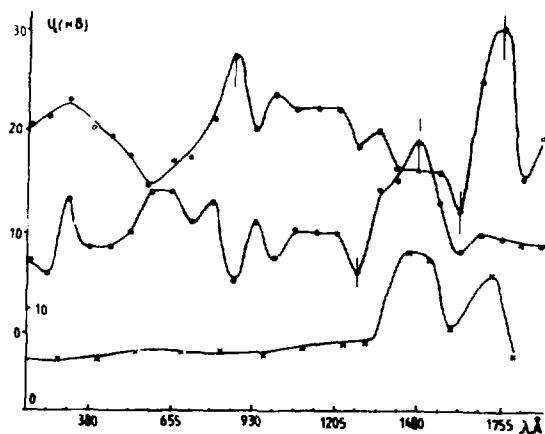


Рис.6. Спектр излучения электронно-ионного кольца:  
 ● - измерения в момент времени  $t_1$ ,  
 ○ - измерения в момент времени  $t_2$ ,  
 x - измерения при длительном удержании  
 электронно-ионного кольца.

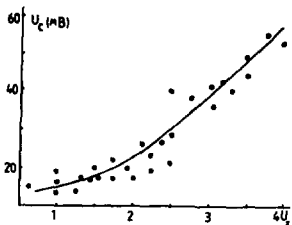


Рис.7. Зависимость амплитуды сигнала МКП-детектора от относительного числа электронов (1 деление равно 17 В) на длине волны  $\lambda = 1750 \text{ \AA}$ .

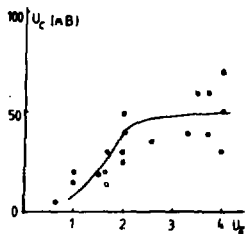


Рис.9. Зависимость амплитуды сигнала с МКП-детектора от относительного числа электронов в кольце в "0"-порядке дифракции.

В этих диапазонах излучают ионы остаточного газа:  $N^+$ ,  $N^{++}$ ,  $C^+$ ,  $C^{++}$ ,  $C^{+++}$ ,  $Ar^+$ ,  $Ar^{++}$ ,  $Ar^{+++}$ . При этом зависимость амплитуды сигнала с детектора

$U_c$ , пропорционального мощности излучения ионов, от числа электронов (сигнал  $U_e$ ) близка к квадратичной при  $\lambda = 1750 \text{ \AA}$  (рис.7), что свидетельствует о накоплении ионов в кольце. В то же время в зависимости амплитуды сигнала от  $N_e$  в районе длин волн  $500 + 600 \text{ \AA}$ , соответствующем трехразрядным ионам остаточного газа (рис.8), наблюдается спад при  $U_e > 40$  В, а в зависимости  $U_c(N_e)$  в "0"-

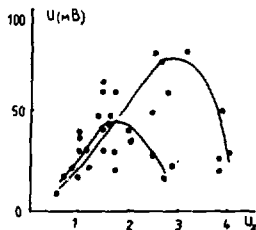


Рис.8. Зависимость амплитуды сигнала с МКП-детектора от относительного числа электронов в кольце на длине волны  $\lambda = 500 \text{ \AA}$ .

диуса  $R_k = 4(8)$  см. Т.к. амплитуда сигнала мала, а фоновые сигналы из-за потерь электронов велики, то сканирование спектра осуществлялось при ширине входной и выходной щели  $\Delta S = 2$  мм (ширина спектрального интервала  $30 \text{ \AA}$ ). На рис.6 представлены спектры излучения электронно-ионного кольца в двух режимах сжатия ( $U_y = 3 \times 17$  В), причем в коротком сжатии два момента времени, указанные на рис.5. Давление остаточного газа в камере  $P = 2 \cdot 10^{-8}$  Тор.

В спектре в момент времени  $t_2$  выделяются два максимума излучения в районах длин волн  $1750 \text{ \AA}$  и  $860 \text{ \AA}$ .

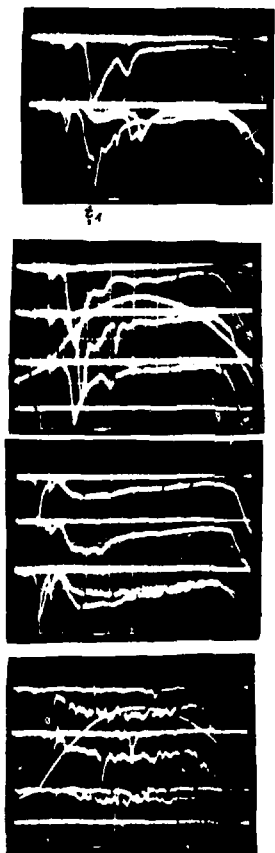


Рис.10. Сигнал с датчика ЖПД без монохроматора: а)  $\rho = 2 \cdot 10^{-8}$  Тор; 100 мВ/дел; 200 мкс/дел;  $U_g = 50$  В; 35 В; 55 В; б)  $U_g = 50$  В; 50 В; 40 В; в)  $\rho = 3 \cdot 10^{-7}$  Тор,  $U_g = 35$  В; 42 В; 25 В; 35 В; г) фильтр  $MgF_2$ , 10 мВ/дел.

порядке дифракции (рис.9) при  $U_g \approx 30$  В существует перелом, и она выполаживается. Эти факты указывают, что в электронных кольцах происходит накопление ионов, однако этот процесс является очень сложным.

При длительном удержании в спектре выделяется пик в районе  $\lambda = 1470 \text{ \AA}$  (рис.6), соответствующий однозарядным ионам. Время измерения - 20 мс от момента инъекции электронного пучка. При этом зависимость мощности излучения от  $N_e$  является линейной. Отсутствие излучения, соответствующего ионам более высокой зарядности, объясняется, по-видимому, тем, что в режиме длительного удержания в данной схеме фактор  $jT$ , где  $j$  - плотность тока электронов,  $T$  - время удержания, определяющий зарядность ионов, ниже, чем в схеме короткого сжатия, примерно на порядок.

В последующих экспериментах датчик  $W \dot{y}$  устанавливался без монохроматора с фильтрами из лавсана толщиной 5 мкм (пропускание при  $\lambda < 100 \text{ \AA}$ ) и фтористого магния  $MgF_2$  (пропускание при  $\lambda > 1400 \text{ \AA}$ ). При этом сигнал с датчика в геометрии рис.1 на порядок выше, чем в геометрии рис.2, что объясняется, по-видимому, фокусирующим действием осевого патрубса. Отметим, что фоновые условия в геометрии рис.1 значительно лучше. На рис.10 показаны типичные осциллограммы сигналов

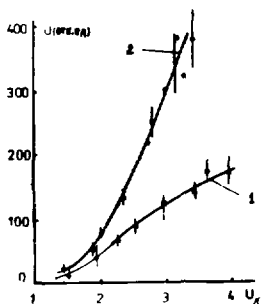


Рис.11. Зависимость интеграла первого пика ВУФ-излучения от относительного числа электронов в кольце в двух режимах сжатия.

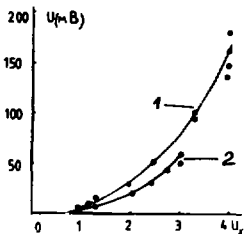


Рис.12. Зависимость амплитуды сигнала ВУФ-излучения после первого пика от числа электронов в режимах сжатия.

с датчика без фильтров и с фильтрами. Сигнал имеет очень сложный вид. Вначале, в момент времени  $t_1$  (появление кольца в зоне видимости датчика), идет мощный сигнал длительностью  $\approx 200$  мкс, зависимость интеграла которого по времени от  $N_e$  показана на рис.11. Зависимость мощности излучения от  $N_e$  после первого пика показана на рис.12. Зависимости приведены в двух режимах сжатия, отличающихся  $n$ -траекториями (рис.4). В мягком свете (фильтр  $MgF_2$ ) первого мощного сигнала нет. Этот факт, а также его короткая длительность и резкая зависимость от числа электронов позволяют предположить, что этот сигнал обусловлен рекомбинационным излучением потерянных ионов при высадке их на стенку камеры. Дополнительным аргументом в пользу этого предположения является то обстоятельство, что спектр рекомбинационного излучения сдвинут в более жесткую область по длинам волн по сравнению со спектром возбуждения  $^{16}$ . С целью проверки этого предположения были проведены измерения с помощью коллектора частиц, установленного в геометрии рис.1. Из осциллограммы сигнала с коллектора (рис.13) видно, что полярность сигнала - положительная. Это объясняется, по-видимому, тем, что в течение конечного этапа цикла сжатия существует уход ионов из электронно-ионного кольца. В экспериментах также регистрировался высокочастотный (ВЧ) сигнал при использовании коллектора в качестве приемной антенны (рис.13). Из осциллограммы видно, что в момент времени, соответствующий первому пику ВУФ-излучения, регистрируется вспышка ВЧ-излучения с частотой  $20 \pm 50$  МГц, генерируемого элект-



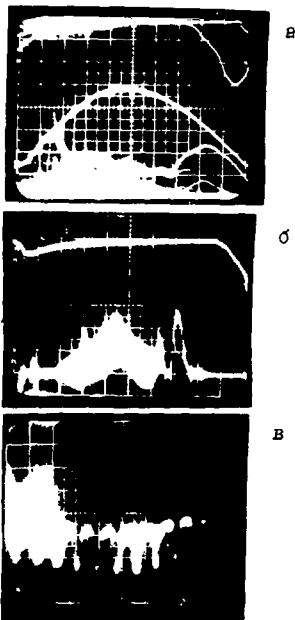


Рис.13. Осциллограммы сигналов с коллектора: а) токовый режим регистрации, сигнал положительной полярности 200 мкс/дел; б) режим регистрации ВЧ-излучения, 200 мкс/дел; в) развертка ВЧ-сигнала, 50 нс/дел.

ления пика соответствует изменению показателя спада магнитного поля  $n$  в диапазоне  $0,1 < n < 0,18$  (рис.4), что соответствует временному интервалу в цикле сжатия 3,3-3,5 мс от момента инжекции электронного пучка в адгезатор. Более точно определить величину  $n$  невозможно вследствие ее резкого уменьшения в этом интервале времени. К этому времени в электронном кольце может накапливаться значительное количество ионов <sup>13/</sup>, так что поправка к собственной частоте колебаний электронов в поле ионов  $Q_{ei}$  (в единицах частоты обращения электронов) может достигать величины  $Q_{ei} = 0,1+0,18$  <sup>17/</sup>. Эти факты

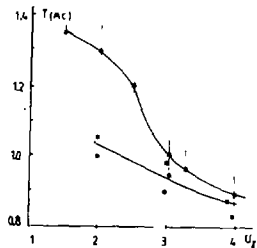


Рис.14. Зависимость времени появления первого пика излучения от относительного числа электронов: о - режим 1, ● - режим 2.

тронно-ионным кольцом. В более поздние времена также наблюдается ВЧ-активность кольца. Совокупность указанных фактов позволяет предположить, что в электронно-ионном кольце развивается неустойчивость.

Из осциллограмм рис.10 видно, что при увеличении числа электронов первый пик излучения сдвигается в более ранние времена. Этот факт иллюстрируется рис.14, на котором показано изменение времени появления пика в режимах сжатия, отсчитываемого от времени включения III ступени сжатия. Время появления

позволяют предположить, что в электронно-ионном кольце развивается радиальная дипольная неустойчивость, условие возбуждения которой определяется уравнением <sup>13/</sup>

$$Q_{ie} + \sqrt{1-n + Q_{ei}^2} = 1, \quad (1)$$

где  $Q_{ie}^2 = Q_{ei}^2 / \xi^2$  - частота колебаний ионов в поле электронов;  $\xi^2$  - фактор загрузки, определяющий отношение суммарной массы ионов и электронов в кольце.

С ростом числа электронов и, соответственно, ионов в кольце и величины  $Q_{ei}$  время развития неустойчивости должно сдвигаться в сторону увеличения показателя спада вдоль  $n$ -траектории, что соответствует экспериментальному факту более раннего появления первого пика  $\lambda\Phi$ -излучения. Дополнительным аргументом является факт уменьшения первого пика излучения с увеличением давления остаточного газа в камере адгезатора (рис.10).

В экспериментах обнаружено, что развитие неустойчивости может быть существенно уменьшено подбором  $n$ -траектории при сжатии кольца (режим I, рис.4). В этом режиме существенно уменьшаются потери ионов (рис.11), возрастает интенсивность излучения после пика потерь (рис.12) и количество оставшихся электронов в кольце.

### ВЫВОДЫ

1. В работе предлагается и используется методика измерения параметров ионов в электронно-ионных кольцах по излучению ионов в области вакуумного ультрафиолета.

2. Измерены спектры излучения электронно-ионного кольца в диапазоне длин волн  $300 \text{ \AA} < \lambda < 2000 \text{ \AA}$  с помощью спроектированного вакуумного монохроматора и датчика на основе микроканальных пластин.

3. Показано, что накопление ионов носит сложный характер. В процессе сжатия электронного кольца наблюдаются потери ионов, которые очень чувствительны к параметрам электронно-ионного кольца и внешнего магнитного поля и влияют на достижение максимальной зарядности ионов. Настройкой режимов сжатия удается существенно уменьшить потери и стабилизировать процесс накопления ионов.

4. Показано, что в электронно-ионных кольцах коллективного ускорителя происходит накопление ионов из атмосферы остаточного газа по крайней мере третьей зарядности.

### Литература

1. Долбиллов Г.В. и др. ЖТФ, т.55, в.7, 1985, с.1211.
2. Инкин В.Д. и др. Сообщение ОИЯИ Р9-12725, Дубна, 1979.

3. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. М.: Атомиздат, 1979.
4. Александров В.С. и др. Сообщение ОИЯИ Р9-88-423, Дубна, 1988.
5. Кузнецов И.В. и др. Препринт ОИЯИ 9-86-210, Дубна, 1986.
6. Подгорный И.М. Лекции по диагностике плазмы. М.: Атомиздат, 1968, с. 118.
7. Алексахин Ю.И. и др. Сообщение ОИЯИ Р9-88-424, Дубна, 1988.

Рукопись поступила в издательский отдел  
9 января 1990 года.