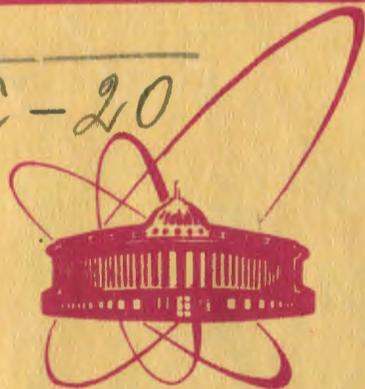


C-20



объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

2310 / 2-81

11/5-81

P9-80-866

В.П.Саранцев, В.Д.Инкин, А.А.Мозелев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ ИОНОВ
В ЭЛЕКТРОННЫХ КОЛЬЦАХ

Направлено в ЖТФ

1980

ВВЕДЕНИЕ

Метод коллективного ускорения ионов ^{/1/} основан на получении устойчивых электронно-ионных колец. Ускорение ионов электронными кольцами эффективно при определенных условиях, для создания которых необходимо исследование процесса накопления ионов в электронных кольцах. Этому вопросу посвящен ряд теоретических работ ^{/2-8/}. Нейтральные атомы остаточного газа, попадая внутрь электронного кольца, ионизируются электронным ударом. Образовавшиеся ионы удерживаются в поле объемного заряда электронов, так как потенциальная энергия ионов в среднем много больше передаваемой им при столкновении кинетической энергии. Поэтому большинство образующихся ионов захватывается в потенциальную яму электронного кольца. При дальнейших столкновениях ионов с электронами кольца зарядность ионов будет расти. Накопление ионов будет приводить к "выползанию" потенциальной ямы, и в какой-то момент времени потенциальная энергия ионов в кольце сравнится с кинетической энергией, передаваемой им при столкновении, в результате чего ионы начнут уходить из объема электронного кольца.

Кроме того, в двухкомпонентных кольцах возможны неустойчивости, которые могут быть также причиной ограниченного количества ионов в кольцах. В Гаршинге были проведены эксперименты с электронными кольцами ^{/7/}, показавшие наличие некоторых когерентных процессов, однако они не позволяют понять, какой процесс является определяющим для предельного количества накапливаемых ионов: электронно-ионная неустойчивость или нейтрализация потенциальной ямы кольца. Кроме того, по этим результатам нельзя сделать заключения о величине предельного количества накапливаемых ионов.

Представляет интерес также исследование процесса накопления ионов для определения момента вывода электронно-ионных колец из адгезатора. В настоящее время на прототипе КУТИ успешно эксплуатируется система диагностики электронно-ионных колец по тормозному излучению ^{/8/}. Результаты, полученные при использовании этой системы для экспериментального исследования процесса накопления ионов в электронных кольцах, излагаются в настоящей работе.

УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ

Эксперименты по исследованию процесса накопления ионов в электронных кольцах из остаточного газа проводились на прототипе КУТИ ОИЯИ. Изучение динамики электронного кольца на конечных радиусах сжатия^{9/} позволило выбрать оптимальные значения параметров системы сжатия колец. Измеренные зависимости размеров электронного кольца от амплитуды импульса тока III ступени системы сжатия адгезатора и от времени сжатия используются в настоящей работе для обработки экспериментальных данных.

Осциллограммы импульса тока III ступени системы сжатия адгезатора и сигналов фотоумножителя, регистрирующего тормозное излучение электронов при рассеянии на ионах, приведены на рис.1. Накопление ионов в данном случае производилось при ионизации нейтралов, попадающих в кольцо из газодинамического источника. В верхней части показан сигнал с ФЭУ, получаемый в эксперименте без включения источника, в нижней - с включением /для иллюстрации тормозного излучения электронов/. Временная развертка на рис.1 - 500 мкс/дел, амплитудная - 2 В/дел. Включение тока III ступени производится в момент, соответствующий времени $t = 1,2$ мс от момента инжекции, а максимум магнитного поля достигается при $t = 2,5$ мс. Для размеров электронного кольца является определяющей величина импульса тока III ступени. В экспериментах по исследованию процесса накопления ионов в электронных кольцах значение этого напряжения устанавли-

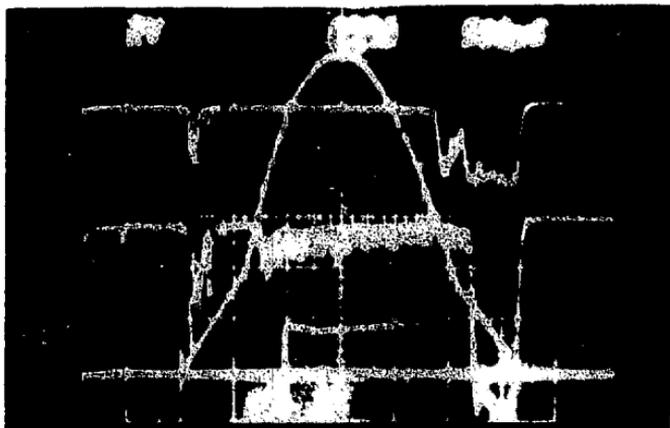


Рис.1. Осциллограммы импульса тока III ступени и сигналов фотоумножителя.

валось в пределах $U_{II} = 20 \pm 24$ кВ. Значение большого радиуса колец при этом в процессе сжатия изменялось от 6 до 3 см за время 1,7–2,5 мс от момента инжекции. Малый радиус колец соответственно менялся в пределах 0,3–0,15 см.

Диагностика электронно-ионных колец проводилась с помощью системы, основанной на регистрации тормозного излучения электронов, рассеянных на ионах. На рис.2 показана осциллограмма сигнала с фотоэлектронного умножителя /ФЭУ/, регистрирующего тормозное излучение электронов с ионов, накопленных в кольце ионизацией нейтралов остаточного газа электронным ударом. В нижней части осциллограммы показаны строб-импульсы счетчиков, соответствующие временным интервалам обработки регистрируемого тормозного излучения. Всего строб-импульсов шесть, что соответствует числу исследуемых временных интервалов в каждом цикле ускорения. Шести точек было достаточно для исследования процесса накопления ионов во времени. Использование аппаратуры в стандарте КАМАК на линии с мини-ЭВМ позволяло определять число накопленных в кольце ионов в масштабе реального времени. Обработка информации производилась с помощью специальной программы /10/, написанной на языке ФОКАЛ-М. Величина $N_e \cdot N_i$ определялась расчетным путем по регистрируемой интенсивности тормозного излучения электронов, рассеянных на ионах. Расчет производился по формуле

$$N_{\gamma} = c \cdot \tau \cdot N_e \cdot N_i / V \cdot \Phi(Z_0) \cdot G,$$

где $\Phi(Z_0)$ - интегральное сечение тормозного излучения, c - скорость света, τ - время измерения, равное длительности стро-

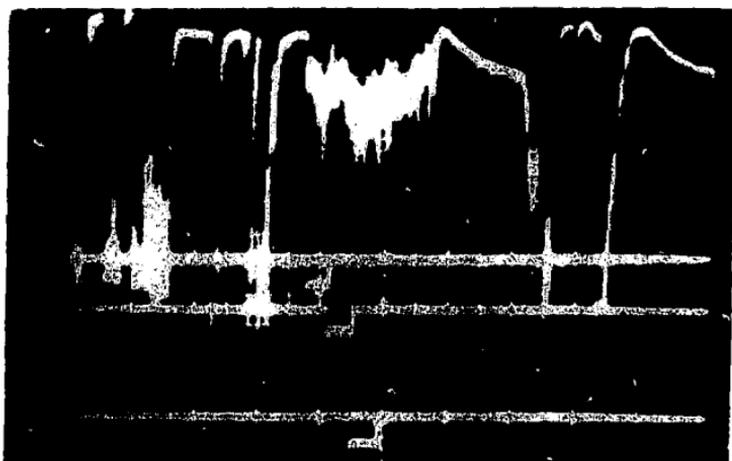


Рис.2. Осциллограммы сигнала с фотоумножителя и строб импульсов.

ба счетчика, V - объем электронно-ионного кольца $1/9$, G - геометрический фактор регистрации тормозного излучения. Результаты измерений в виде $N_e \cdot N_i$ - произведения числа электронов на число ионов в кольце - для всех точек при каждом цикле сжатия выводились на телетайп. В конце каждой серии измерений производился также расчет и вывод значений математического ожидания и дисперсии для $N_e \cdot N_i$.

Для разделения величины произведения $N_e \cdot N_i$ на число ионов и электронов использовался монитор, представляющий собою сцинтилляционный детектор с ФЭУ, работающий в интегральном режиме, которым регистрировалось тормозное излучение от высадки кольца на мишень или стенки камеры при снятии магнитного поля III ступени.

Для определения N_e в абсолютных единицах монитор предварительно был прокалиброван с помощью метода определения числа электронов по тормозному излучению при их рассеянии на атомах остаточного газа на начальных этапах сжатия колец $1/11$. Значение N_e при измерениях находилось в пределах $13-7 \cdot 10^{12}$ и регистрировалось с помощью монитора и запоминающего осциллографа при каждом цикле сжатия колец.

Для исследований зависимостей накопления ионов от давления остаточного газа в камере адгезатора осуществлялся контроль и постоянное измерение этой величины. Измерения проводились при значениях давления: 1. $P \approx 2 \cdot 10^{-7}$ Торр; 2. $P \approx 1 \cdot 10^{-7}$ Торр; 3. $P \approx 7 \cdot 10^{-8}$ Торр; 4. $P \approx 5 \cdot 10^{-8}$ Торр. Эти значения поддерживались постоянными при измерениях.

Контроль за режимом сжатия колец осуществляется с помощью запоминающего осциллографа. По осциллограммам проверялось отсутствие потерь электронов в процессе сжатия, которые могли привести к ошибкам измерений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Зависимости произведения числа накопленных в кольце ионов на число электронов - $N_i \cdot N_e$ от времени сжатия колец приводятся на рис. 3. Отсчет времени берется от момента инжекции электронного пучка в адгезатор. Измерение зависимостей проводилось при значениях давления остаточного газа в камере адгезатора $P \approx 2 \cdot 10^{-7}$ Торр; $P \approx 1 \cdot 10^{-7}$ Торр; $P \approx 7 \cdot 10^{-8}$ Торр. Каждая кривая есть результат усреднения $N_e \cdot N_i$ по двадцати циклам ускорителя с числом электронов в кольцах $N_e \approx (4-5) \cdot 10^{12}$, регистрируемых монитором обратной высадки. Характерно, что при изменении давления в камере адгезатора положение максимума кривых накопления ионов сдвигается во времени.

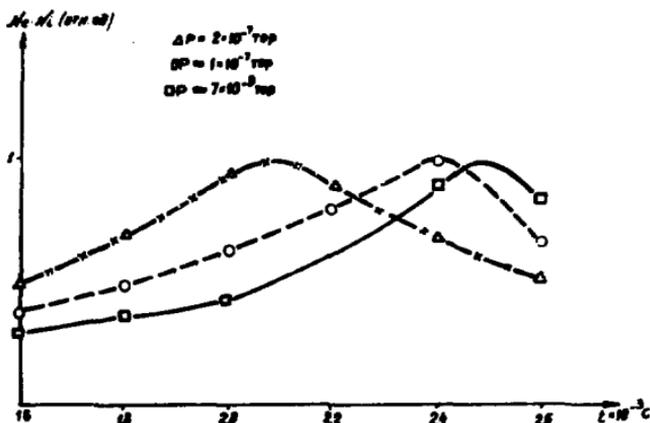


Рис. 3. Зависимости накопления ионов для разных значений P .

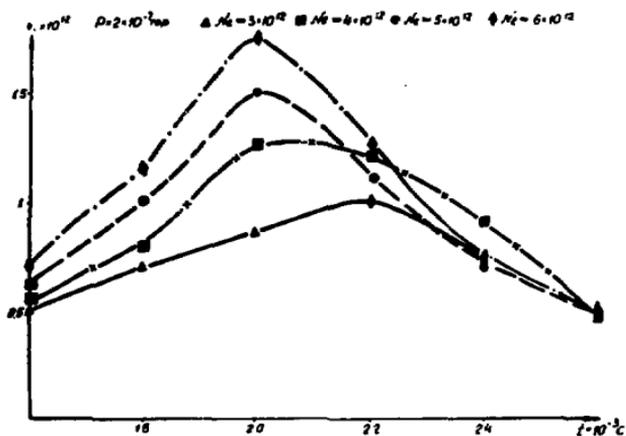


Рис. 4. Зависимость накопления ионов для различных N_0 и $P = 2 \cdot 10^{-7}$ Торр.

На рис. 4 приводятся зависимости полного числа накопленных в кольцах ионов от времени. Значения N_1 приводятся в абсолютных единицах.

Кривые приведены для четырех значений N_0 :

1. $N_0 = 3 \cdot 10^{12}$,

3. $N_0 = 5 \cdot 10^{12}$,

2. $N_0 = 4 \cdot 10^{12}$.

4. $N_0 = 6 \cdot 10^{12}$.

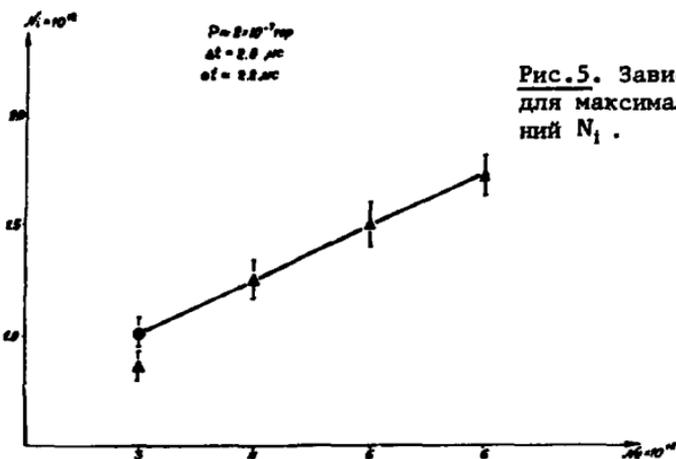


Рис.5. Зависимость $N_i(N_e)$ для максимальных значений N_i .

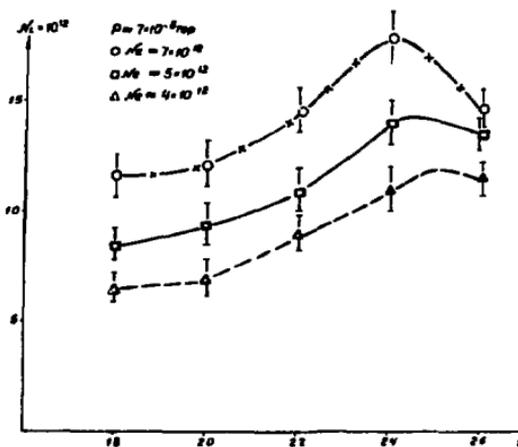


Рис.6. Зависимости накопления ионов для различных N_e и $P = 7 \cdot 10^{-8}$ Торр.

Измерение N_e производилось с помощью монитора обратной высадки. Давление в камере адгезатора $P \approx 2 \cdot 10^{-7}$ Торр. Положение во времени максимума кривых сдвигается при изменении N_e . На рис.5 приводится соответствующая зависимость $N_i(N_e)$ для максимального значения N_i .

что соответствует для $N_e = 3 \cdot 10^{12}$ времени $t \approx 2,2$ мс от момента инжекции, для остальных значений N_e $t = 2$ мс. Точка, соответствующая $t = 2$ мс для $N_e = 3 \cdot 10^{12}$, не ложится на прямую, так как в это время N_i в электронном кольце не достигает максимума. Линейная зависимость $N_i(N_e)$ в максимуме говорит о том, что максимальное число накопленных ионов зависит не от каких-либо случайных процессов, а от величины N_e - потенциала кольца. В пользу этого вывода говорят также временные сдвиги максимума кривых накопления ионов при изменении давления остаточного газа в камере, а также интенсивности электронной компоненты

кольца. Из условия эффективного ускорения ионов электронными кольцами^{12/}, учитывая экспериментальные кривые накопления ионов и их расчетные средние зарядности, можно определить величину давления остаточного газа в камере адгезатора. Для прототипа КУТИ это рабочая область давлений, определяемая неравенством $P \geq 1 \cdot 10^{-7}$. Для более точного определения этой величины необходимо экспериментально измерять средние зарядности ионов. Представляют большой интерес в этой связи зависимости полного числа накопленных ионов от времени для давлений из рабочей области. На рис.6 приводятся кривые накопления ионов для $P \approx 7 \cdot 10^{-8}$ Торр и $N_0 \approx 4 \cdot 10^{12}$; $N_0 \approx 5 \cdot 10^{12}$; $N_0 \approx 7 \cdot 10^{12}$. Кривые - результат усреднения N_1 по двадцати циклам сжатия колец. Максимум кривых находится во временном интервале $t = /2,4-2,6/$ мс от момента инжекции. Величина сдвига максимума кривых накопления ионов при изменении N_0 менее значительна, чем в случае $P \approx 2 \cdot 10^{-7}$ Торр. Для режима с $P \approx 7 \cdot 10^{-8}$ Торр представляют большой интерес зависимости $N_1(N_0)$, так как они могут быть использованы для различных исследований и измерений, проводимых на прототипе КУТИ и других ускорителях с электронными кольцами. Эти зависимости приводятся на рис.7 для моментов времени $t = 2,0$ мс; $t = 2,2$ мс; $t = 2,4$ мс.

На рис.8 показаны кривые накопления ионов для величины давления в камере адгезатора $P \approx 5 \cdot 10^{-7}$ Торр и интенсивности электронной компоненты колец $N_0 \approx 3 \cdot 10^{12}$; $N_0 \approx 5 \cdot 10^{12}$. По временному характеру эти зависимости не отличаются значительно от тех, которые приведены на рис.7, так как при $t = 2,5$ мс от момента

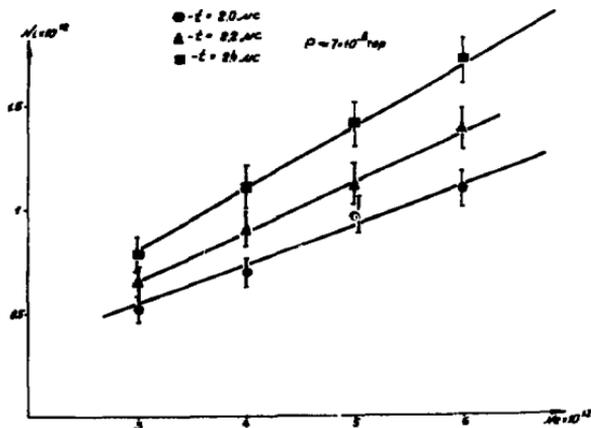


Рис.7. Зависимости $N_1(N_0)$ для $P \approx 7 \cdot 10^{-8}$ Торр и различных моментов времени.

Рис. 8. Зависимости накопления ионов для $P \approx 5 \cdot 10^{-8}$ Торр, расчетные и экспериментальные.

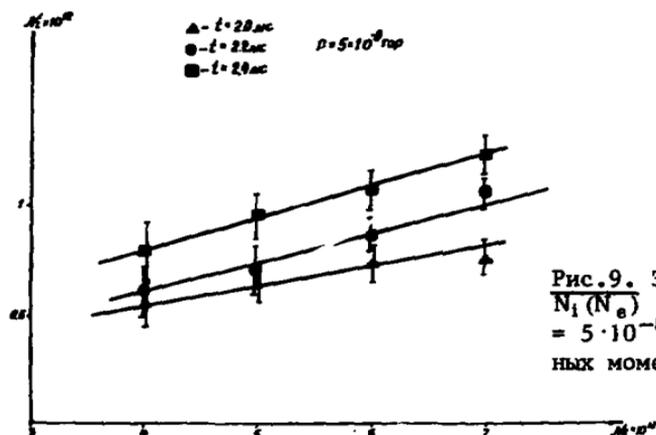
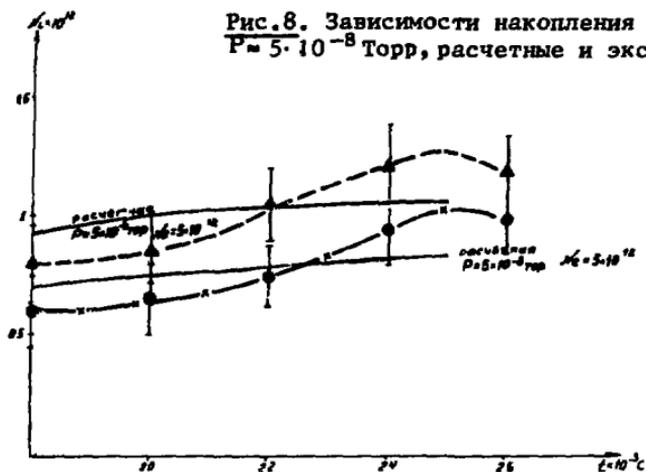


Рис. 9. Зависимости $N_i(N_e)$ для $P = 5 \cdot 10^{-8}$ Торр и различных моментов времени.

инъекции рост величины магнитного поля III ступени прекращается, а для $P \approx 7 \cdot 10^{-8}$ Торр максимум накопления ионов достигается именно в это время. Сплошными линиями на рис. 9 приводятся расчетные кривые накопления $N_i(N_e)$ для $P = 5 \cdot 10^{-8}$ Торр, $N_e = 3 \cdot 10^{12}$; $N_e = 5 \cdot 10^{12}$. Результаты эксперимента достаточно хорошо согласуются с расчетными.

На рис. 9 приводятся зависимости $N_i(N_e)$ для $P \approx 5 \cdot 10^{-8}$ Торр и временных интервалов $t = 2$ мс, $t = 2,2$ мс и $t = 2,4$ мс. Эти зависимости, как было указано выше, для $P = 7 \cdot 10^{-8}$ Торр представляют большой интерес для дальнейших экспериментов с электронными кольцами.

ВЫВОДЫ

1. Количество накапливаемых в электронных кольцах ионов N_i растет со временем сжатия колец до какой-то предельной величины N_i макс., затем начинает спадать.

2. Положение во времени максимума кривых накопления ионов изменяется с изменением величины давления остаточного газа в камере адгезатора. Степень роста кривых накопления пропорциональна давлению.

3. Значение N_i макс. прямо пропорционально числу электронов в кольцах. Величина числа накопленных ионов к определенному моменту времени сжатия колец пропорциональна N_0 при постоянном давлении остаточного газа в камере адгезатора.

4. Ограничение числа накапливаемых ионов в электронных кольцах величиной N_i макс. связано с "выполаживанием" потенциальной я.з кольца, приводящим к его нейтрализации, а не с какими-либо неустойчивостями кольца.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность А.Б.Кузнецову за полезные советы и обсуждения, Г.В.Долбилову и А.А.Фатееву за помощь при выполнении работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Векслер В.И. и др. АЭ, 1968, 24, с.317.
2. Иовнович Н.Л., Фикс Н.Н. ОИЯИ, Р9-4849, Дубна, 1969.
3. Георге В. и др. ОИЯИ, Р9-6555, Дубна, 1972.
4. Дроздовский А.А. Препринт ИТЭФ-100, М., 1973.
5. Перельштейн Э.А., Ширков Г.Д. ОИЯИ, Р9-11412, Дубна, 1978.
6. Domachec W., Hofmann I. Particle Accelerators, 1979, 9, p.159.
7. Andeifinger C. et al. Proc. 9th Int. Conf. on High Energy Accelerators. Stanford, California, 1974, p.218.
8. Инкин В.Д. и др. Материалы X Международного симпозиума по ядерной электронике. Дрезден, 1980.
9. Саранцев В.П. и др. ОИЯИ, Р9-10917, Дубна, 1977.
10. Инкин В.Д., Мозелев А.А., Саранцев В.П. ОИЯИ, Р9-12940. Дубна, 1980.
11. Инкин В.Д. и др. ОИЯИ, Р9-12726, Дубна, 1979.
12. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Физика плазмы, 1977, 3, с.449.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 декабря 1980 года.