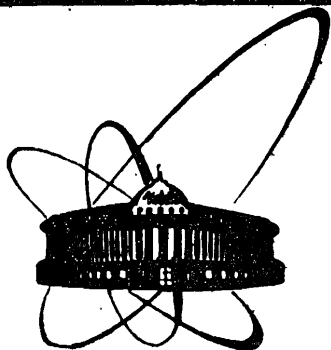




**объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна**

9-86-210

И.В.Кузнецов, Э.А.Перельштейн, В.Н.Разувакин,
А.П.Сумбаев, В.А.Тимохин, А.Е.Черемухин

**СХЕМА ДЛЯ ДЛИТЕЛЬНОГО УДЕРЖАНИЯ
ЭЛЕКТРОННОГО КОЛЬЦА
НА МАЛЫХ РАДИУСАХ СЖАТИЯ
В ПРОТОТИПЕ КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**

Направлено в журнал
"Вопросы атомной науки и техники"

1986

В работах [1-3] отмечается, что кольцо релятивистских электронов, формируемое в коллективном ускорителе, может служить эффективным источником ионов высокой зарядности, причём степень зарядности ионов, получаемых в электронно-ионном кольце существенно определяется временем нахождения ионов в потенциальной яме кольца [2], т.е. длительностью цикла сжатия кольца и временем существования его в сжатом состоянии. В [3] предложен способ увеличения времени удержания электронного кольца в медленно спадающем магнитном поле коллективного ускорителя, формируемого путём закорачивания токовых катушек магнитной системы в момент достижения в них максимального значения тока. В настоящей работе содержатся результаты экспериментальной проверки возможности создания схемы для длительного удержания электронно-ионного кольца на малых радиусах на прототипе коллективного ускорителя тяжёлых ионов (ПКУТИ).

Магнитный цикл формирования и сжатия электронных колец в ПКУТИ задаётся работой четырех ступеней – четырёх пар безжелезных токовых катушек, представленных на рис.1 [4]. Катушки 3,4 ("о" ступень) формируют квазистационарное поле напряжённостью ~ 200 Э для захвата пучка на круговую орбиту. Катушки сжатия 5+10 обеспечивают в области, занятой кольцом 2, нарастание магнитного поля от ~ 200 Э до ~ 20 кЭ за времена $t_{сж} \approx (2,5 + 2,8)$ мс. Ускоряющий соленоид формирует градиентное магнитное поле для предварительного ускорения электронно-ионных колец. Длительного удержания электронно-ионного кольца можно достичь путём закорачивания катушек последней (третьей) ступени сжатия диодным коммутатором. Принцип увеличения длительности затухания магнитного потока индуктивных катушек при замыкании их кроубар-замыкателем в технике формирования больших импульсных магнитных полей известен [5]. Схема с диодом, замыкающим индуктивную нагрузку, изображённая на рис.2а, является разновидностью схемы кроубар-замыкателя. Перехват тока нагрузки диодом D (при $L_0 \ll L_H$) происходит автоматически при переполюсовке напряжения на индуктивности L_H в момент достижения в ней максимального значения тока – рис.2б. После этого в контуре, образованном индуктивностью и диодом, начинает циркулировать ток, изменяющийся по закону, близкому к $I = I_0 \cdot e^{-t/\tau}$. Здесь I_0 – значение тока в индуктивности в момент перехвата в диод, а постоянная спада $\tau \approx L_H/R$, где R – актив-

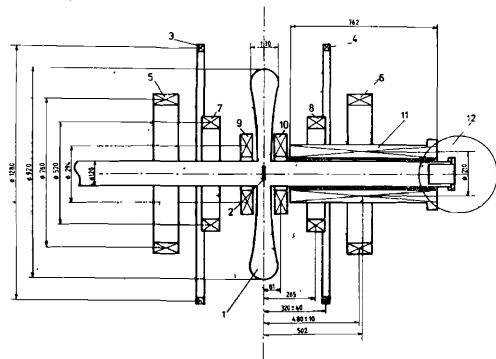


Рис.1. Магнитная система прототипа коллективного ускорителя тяжёлых ионов. 1 - вакуумная камера адгезатора; 2 - электронное кольцо; 3 + 10 - катушки магнитного поля: 3 + 4 - катушки "о" ступени, формирующей первый оборот, 5 + 6 - катушки I ступени сжатия, 7 + 8 - катушки II ступени сжатия, 9 + 10 - катушки III ступени сжатия; 11 - ускоряющий градиентный магнитный соленоид; 12 - узел ввода диагностических устройств.

ное сопротивление потерь контура (на схеме отсутствует). При достижении в III ступени максимального значения тока поле в области, занятой кольцом, должно, в основном, определяться параметрами и током катушек III ступени. После замыкания катушек диодным коммутатором его дальнейшее изменение во времени должно быть также близким к экспоненциальному: $H \approx H_0 \cdot e^{-t/\tau}$. Здесь H_0 - значение поля в момент пе-

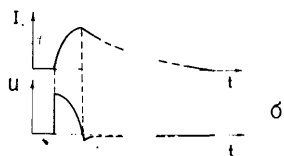
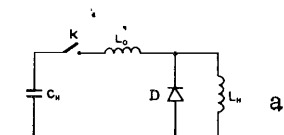


Рис.2. а - схема с диодом, включённым в качестве крубар-замыкателя, б - эфир тока и напряжения. C_n - накопительная ёмкость, K - ключ, L_n - индуктивная нагрузка, D - диод-замыкатель, L_0 - паразитная индуктивность ($L_0 \ll L_n$); I - ток в нагрузке, U - напряжение на индуктивности L_n .

рехвата тока. Измеренные величины параметров контура составляли: общее сопротивление катушек и подводных кабелей по постоянному току - $(0,042 \pm 0,001) \Omega$, суммарная индуктивность последовательно включенных катушек третьей ступени (с учетом влияния камеры адгезатора) - 2,3 мГн. Соотношение этих параметров обеспечивало выполнение условия $\tau_{сн} \approx 55 \text{ мс} \gg t_{сж}$, что позволяло надеяться на получение на радиусе сжатого кольца ведущего поля, близкого по величине к максимальному полю сжатия, в промежутке времени, превышающем время сжатия в несколько раз.

Реализация схемы длительного удержания произведена на основе традиционной схемы питания катушек III ступени (рис.3а), работа которой заключается в следующем. Ток в последовательно соединённых катушках ступени L_1 и L_2 формируется при разряде накопительной ёмкости C_n с помощью тиристорного коммутатора T_1 . Дополнительный дроссель $L_{др}$ включён в схему для снижения скорости нарастания тока в цепи и выключается из работы шунтирующим коммутатором T_2 . Тиристорный коммутатор T_3 обеспечивает режим вывода электронного кольца. Он включается через 600-700 мкс после включения схемы и, шунтируя одну из катушек ступени (L_1 на рис.3а, катушку 10 на рис.1), перераспределяет токи в катушках таким образом, что магнитная яма смещается и выполаживается в сторону шунтируемой катушки, осуществляя тем самым вывод кольца в градиентный ускоряющий соленоид [6].

На рис.3б представлена схема питания катушек III ступени для режима длительного удержания. Перехват тока ступени осуществляется диодным коммутатором D , включённым параллельно катушкам L_1 и L_2 .

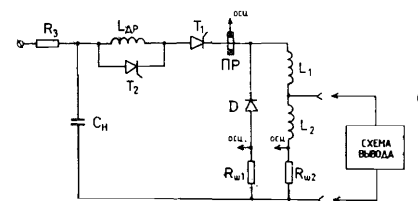
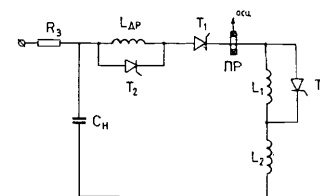
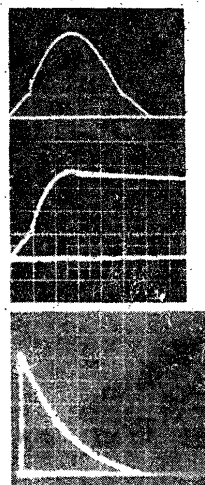


Рис.3. а - традиционная схема питания катушек III ступени сжатия. б - схема питания III ступени в режиме длительного удержания. R_3 - зарядное сопротивление; C_n - накопительная ёмкость; T_1, T_2, T_3 - тиристорные коммутаторы; L_1, L_2 - катушки III ступени сжатия; $L_{др}$ - дроссель затяжки тока, D - замыкающий диодный коммутатор; ПР - пояс Роговского; $R_{ш1}$ и $R_{ш2}$ - измерительные шунты.



а

б

в

Рис. 4. Осциллограммы импульсов тока в катушках III ступени. а – режим сжатия, б – режим сжатия с удержанием. Развертка – 500 мкс/дел. в – ток катушек в режиме длительного удержания. Развертка – 20 мс/дел.

Измерение токов в схемах производится поясами Роговского ПР и шунтами $R_{ш1}=R_{ш2}=5 \cdot 10^{-4}$ Ом.

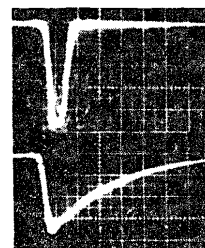
На рис. 4 приведены осциллограммы импульсов тока в катушках в режиме сжатия (4а) и в режиме сжатия с длительным удержанием (4б, в), полученные с шунта $R_{ш2}$. Форма тока в катушках традиционной схемы близка к синусоидальной с длительностью полупериода $\approx 3,0$ мс. Изломы в начале и в конце полусинусоиды обусловлены работой дросселя $L_{др}$.

При включении схемы длительного удержания (рис. 3б) в начале цикла происходят те же самые процессы, что и в традиционной схеме до момента достижения максимального тока в нагрузке. При перехвате тока диодным коммутатором D в контуре L_1-L_2-D начинает циркулировать ток, убывающий по величине с постоянной времени $\approx (L_1+L_2+L_{св})/R_n$, где R_n – суммарное активное сопротивление потерь в цепи, а $L_{св}$ – связь катушек между собой и с камерой. Форма тока по осциллограммам в катушках обеих схем на первой стадии совпадает, а во второй стадии ток в схеме длительного удержания (рис. 4б, в) затухает с характерным временем спада $(35,5 \pm 1)$ мс. Снижение постоянной затухания тока по сравнению с величиной $\tau_{сп} = 55$ мс, полученной из предварительных оценок без учета нелинейных эффектов, видимо, вызвано дополнительными потерями, связанными с наличием катушек других ступеней, камеры адгезатора, элементов согласования кабелей с нагрузкой, а также изменением нелинейных сопротивлений контура под нагрузкой. Это подтверждает изменение измеряемой постоянной затухания тока почти на 20% при изменении зарядного напряжения на C_n от 5 кВ до 20 кВ. Действительно, увеличение длительности тока III ступени с амплитудой 5 кА почти на порядок привело к дополнительному нагреву камеры и элементов схемы. Поэтому во избежание перегрева катушек и вакуумной камеры частота циклов работы схемы снижалась с 0,5 Гц до одного цикла в 30 с.

Первые эксперименты по длительному удержанию проводились при следующих условиях: давление остаточного газа в камере адгезатора $\approx 10^{-4}$ Па, число частиц в кольце $N_e = (I+2) \cdot 10^{12}$. Размеры кольца в конце сжатия обеспечивались максимальным полем III ступени и составляли: большой радиус кольца $r_k = 3,3$ см, малые размеры (средне-квадратичные размеры сечений: $a_z = 2,5$ мм, $a_z = 3,0$ мм [6,7]). Состояние кольца в режиме длительного удержания контролировалось по синхротронному излучению (СИ) и тормозному излучению (ТИ), возникающему при разрушении кольца в конце цикла удержания. Монитором N_e по СИ служил фотодиод ФД – 24 К с максимумом спектральной чувствительности в области 0,85 мкм. Для уменьшения погрешностей, вызванных изменением углового распределения СИ, излучение фокусировалось на чувствительную поверхность фотодиода линзой, собирающей свет от кольца на расстоянии 75 см в апертуре 10 см. Детектором ТИ служил ФЭУ-30 с пластиковым сцинтиллятором.

Измерение длительности сигнала с монитора СИ и времени появления сигнала с детектора ТИ показало, что электронное кольцо в камере адгезатора в поле третьей ступени, медленно спадающем во времени, существует после окончания цикла сжатия ещё, по крайней мере, 30–40 мс. Длительность сигнала с детектора СИ (рис. 5) возросла до 9 мс по основанию. Сигнал с детектора тормозного излучения, соответствующий разрушению кольца, возникал через ~ 50 мс после начала сжатия и исчезал через $\sim 20 + 30$ мс.

Для расширения возможности исследования электронного кольца в режиме длительного удержания был осуществлен вывод кольца из медианной плоскости камеры путём смещения магнитной ямы катушек третьей ступени. С этой целью к катушкам подключалась "схема вывода" (рис. 3б), позволяющая производить перераспределение токов в катушках III ступени: уменьшать ток в катушке L_1 и увеличивать в L_2 в диапазоне ΔI от 0 до 0,8 номинального значения тока в катушках в момент включения



а

б

Рис. 5. Осциллограммы сигналов с детектора синхротронного излучения: а – режим сжатия, б – режим сжатия с удержанием.

Развертка – 1 мс/дел.

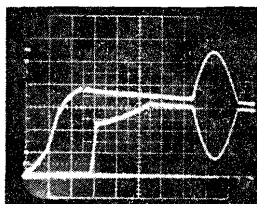


Рис.6. Осциллограммы сигналов с шунтов $R_{ш1}$ и $R_{ш2}$ в режиме удержания с выводом, верхний луч – сигнал с шунта $R_{ш2}$, нижний луч – сигнал с шунта $R_{ш1}$. Развертка – 500 мкс/дел.

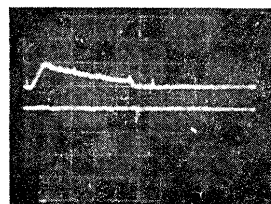


Рис.7. Осциллограммы сигналов с детекторов синхротронного излучения (верхний луч) и тормозного излучения (нижний луч) в режиме длительного удержания с выводом. Развертка – 1 мс/дел.

"схемы вывода". На рис.6 представлены осциллограммы токов, измеренных шунтами $R_{ш1}$ и $R_{ш2}$ в режиме длительного удержания с включением "схемы вывода" через 3,7 мс после начала работы III ступени. Сигнал с шунта $R_{ш2}$ представляет собой ток катушки L_2 (верхняя осциллограмма) и до момента включения схемы вывода повторяет форму тока катушек при обычном удержании. Затем "схема вывода" добавляет в L_2 "полусинусоиду" с длительностью ~ 1 мс. Сигнал с $R_{ш1}$ (нижняя осциллограмма) представляет собой сумму токов катушки L_1 и правой части схемы Зб. Он возникает в момент перехвата диодом тока нагрузки. Излом в начале осциллограммы соответствует "добавке" тока обратного направления – вкладу дросселя $L_{др}$ при закрытии коммутатора T_2 . При включении схемы вывода ток в L_1 падает. Из-за примерного равенства индуктивностей и активных сопротивлений катушек L_1 и L_2 величины изменений токов ΔI_{L1} и ΔI_{L2} от "схемы вывода" близки по величине, а по длительности совпадают с длительностью тока ускоряющего градиентного соленоида (II на рис.1). Выбором величины тока соленоида при синхронном включении его вместе со схемой вывода удалось вывести электронно-ионное кольцо из медианной плоскости. На рис.7 представлены осциллограммы сигналов с детекторов синхротронного излучения и тормозного излучения, полученных в режиме длительного удержания с выводом, включенным через ≈ 4 мс, и сбросом на мишень. Из осциллограмм видно, что после включения схемы вывода сигнал синхротронного излучения резко падает и возникает всплеск тормозного γ -излучения от разрушения кольца на мишени.

Таким образом, созданная схема позволила приступить к изучению электронного кольца в режиме длительного удержания с временем существования на малых радиусах, существенно превышающем время сжатия.

Л и т е р а т у р а .

1. В.П.Саранцев, Э.А.Перельштейн "Коллективное ускорение ионов электронными кольцами". Атомиздат, Москва, 1979.
2. В.А.Perelstein, G.D.Shirkov. ОИЯИ, Е9-85-4, Дубна, 1985.
3. Новиков В.Г., Перельштейн Э.А. Авт.свид. СССР № 766384 от 06.03.79. Бюл.ОИ, 1983, №4, с.351.
4. Л.С.Барабаш и др. ОИЯИ, Р9-8759, Дубна, 1975.
5. Г.Кнопфель. "Сверхсильные импульсные магнитные поля". "Мир", Москва, 1972.
6. В.П.Саранцев и др. ОИЯИ, Р9-10917, Дубна, 1977.
7. В.С.Александров и др. ОИЯИ, Р9-83-862, Дубна, 1983.

Рукопись поступила в издательский отдел
7 апреля 1986 года.