

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

1607/2-81

30/III-81

P9-81-20

В.С.Александров, Э.А.Перельштейн, В.П.Саранцев,
Г.Д.Ширков

О ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОЙ УСКОРЯЮЩЕЙ СИЛЫ
В УСКОРИТЕЛЯХ
С ЭЛЕКТРОННЫМИ КОЛЬЦАМИ

1981

1. Эффективность коллективного метода ускорения ионов электронными кольцами в значительной степени определяется набором энергии ускоряемых ионов на единице длины ускорителя. Максимальный набор энергии, при котором электронно-ионное кольцо ускоряется как целое, определяется формулой^{1/}

$$U = k \frac{2mc^2 N_e \Gamma_e}{\pi \Gamma_0 (a_r + a_z)} \frac{Z}{A},$$

где N_e - число электронов в кольце с большим радиусом Γ_0 и малыми радиальными и аксиальными полурадиусами a_r и a_z ; Γ_e и m - классический радиус электрона и его масса; c - скорость света; Z и A - заряд и массовое число ионов; k - коэффициент, связанный с условием удержания ионов и определяемый видом плотностей электронов и ионов, а также способом внешней фокусировки электронно-ионного кольца.

Увеличение U при фиксированном числе электронов возможно путем уменьшения размеров кольца и повышения заряда накопленных в нем ионов.

Например, существующая магнитная система адгезатора /компрессора/ прототипа коллективного ускорителя тяжелых ионов /КУТИ/ позволяет формировать и ускорять электронные кольца с $\Gamma_{\text{кон}} = 3,5$ см и $a_r, a_z = 1,5 - 2$ мм^{1/}. Дальнейшее уменьшение размеров ограничивается необходимостью увеличения индукции магнитного поля в камере адгезатора и соответственно напряжений на катушках магнитной системы, которые растут, как $1/\Gamma^2_{\text{кон}}$. Согласно расчетам за время существования кольца в сжатом состоянии / $\sim 0,5$ мс/ в нем могут накапливаться ионы тяжелых элементов с $Z/A = 0,1 \div 0,15$ ^{2/}. Для увеличения среднего заряда накопленных ионов тяжелых элементов вдвое необходимо удерживать электронное кольцо 20-30 мс. Это требует значительного повышения мощности системы питания и увеличения теплоотвода от магнитной системы адгезатора. Кроме того, при таких временах жизни электронного кольца существенным становится увеличение его малых размеров за счет рассеяния электронов на накопленных ионах^{3/}.

В конце сжатия в коллективных ускорителях возрастает некогерентное синхротронное излучение релятивистских электронов. Влияние излучения на формирование электронных колец рассматривалось ранее^{1,3-5/}. Потери энергии электронов E на синхротронное излучение даются выражением

$$\frac{dE}{dt} = \frac{2}{3} \frac{E^4}{m^3 c^5} \frac{r_0}{r_0^2}$$

При этом радиус кольца уменьшается по закону

$$\frac{dr_0}{dt} = \frac{1}{1-n} \frac{dE}{dt} \frac{r_0}{E}$$

где n - показатель спада магнитного поля.

В конце сжатия в адгезаторе прототипа КУТИ $n \rightarrow 0$ и $\frac{1}{E} \frac{dE}{dt} = \frac{1}{r_0} \frac{dr_0}{dt} = 30 \text{ с}^{-1}$. Таким образом, за время формирования электронного кольца его радиус и энергия электронов уменьшаются за счет синхротронного излучения всего на 2-3%. Скорость уменьшения радиуса в постоянном магнитном поле значительно увеличится, если показатель спада магнитного поля выбрать близким к 1. При $n = 0,8 \div 0,9$ можно за $5 \div 10$ мс получить электронное кольцо с $r_{\text{мин}} = 1,8 \div 2,0$ см. Одновременно за счет синхронного излучения уменьшатся малые размеры кольца. Плотность электронов возрастает в 3-4 раза. За время дополнительного поджатия кольца Z/A для тяжелых ионов достигнет величины $0,25 \div 0,35$. В результате максимально возможный темп ускорения увеличится в 5-10 раз.

Создание на конечных радиусах сжатия магнитного поля с показателем спада, близким к 1, можно обеспечить системой токовых витков с радиусом, примерно равным $r_{\text{ход}}$, расположенных на минимально возможном расстоянии от плоскости кольца.

2. Численное моделирование динамики электронного кольца, процесса накопления ионов и расчет конкретной системы поджатия были выполнены применительно к прототипу КУТИ. Предполагалось, что после обычного сжатия кольцо попадает в магнитное поле с показателем спада, близким к 1, создаваемое катушками дополнительного поджатия /КДП/, дожимается до радиуса $r_{\text{мин}} < 2$ см и выводится на участок ускорения. При выборе варианта системы дополнительного поджатия считалось, что она должна обеспечивать:

1/ поджатие кольца до выбранного радиуса за время $\sim 5-10$ мс при амплитуде тока в КДП, не превышающей 10 кА;

2/ вывод сжатого кольца в аксиальном направлении на участок ускорения /в соленоид со спадающим магнитным полем/, что накладывает ограничение на минимальный радиус витков.

Этим требованиям удовлетворяет система из двух катушек по 20 витков в каждой с неравномерной плотностью намотки, обеспечивающей требуемое радиальное распределение магнитного поля B_z при сжатии и удовлетворительное распределение B_z в момент вывода $\frac{1}{B_z} \left| \frac{\partial B_z}{\partial z} \right| < 10^{-2} \text{ см}^{-1}$, $B_r > 0$.

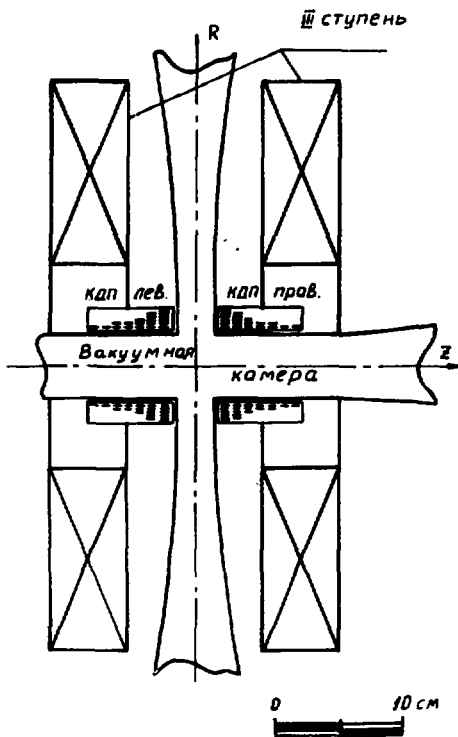


Рис. 1. Система дополнительного поджата для прототипа КУТИ.

На рис. 1 изображена вакуумная камера адгезатора, катушки III ступени сжатия и КДП. Работа схемы проиллюстрирована рис. 2-3. На рис. 2а показаны зависимости токов в катушках ступеней сжатия, КДП и ускоряющего соленоида от времени. Изменение показателя спада вдоль траектории кольца представлено на рис. 2б. На рис. 3а и 3б показаны соответственно зависимости B_z сопутствующего кольца и большого радиуса r_0 от времени. Сжатие до радиуса ~ 5 см / $t=0 \div t_{\text{КДП}}$, рис. 2а/ осуществляется обычным образом магнитной системой прототипа КУТИ. После включения тока в КДП

показатель спада μ на радиусе r_0 стремится к своему максимальному значению 0,97 /рис. 2б/. Происходит быстрое поджатие кольца до 3 см. После достижения максимумов токи в III ступени и КДП изменяются по закону $I = I_{\text{макс}} e^{-\gamma t}$, где $\tau = 50$ мс одинаково для III ступени и КДП и выбрано из условия $\tau \gg \Delta t / \Delta t$ - время поджата/.

После уменьшения радиуса кольца за счет синхротронного излучения до 1,9 см включаются противотоки в правой катушке КДП и ток в соленоиде. Кольцо выводится в область спадающего магнитного поля. Радиус кольца в момент начала ускорения $r_0 = 2,1$ см, релятивистский фактор электронов $\gamma = 28$. Максимальное значение B_z в конце поджата составляет 30 кЭ, в начале участка ускорения $B_z = 22$ кЭ.

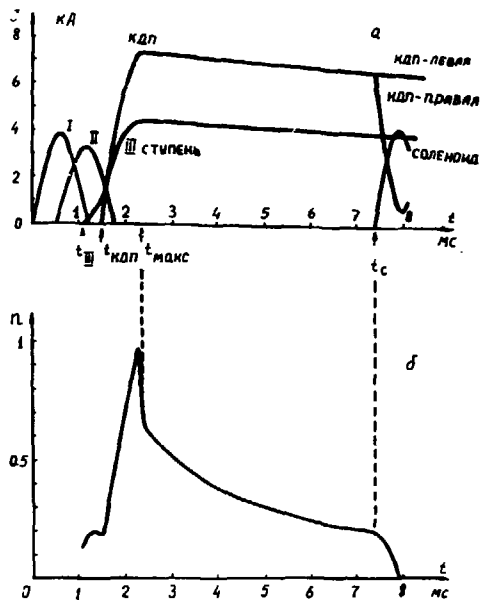


Рис.2. Токи в катушках ступеней сжатия, КДП, ускоряющем соленоиде /а/ и показатель спада магнитного поля /б/.

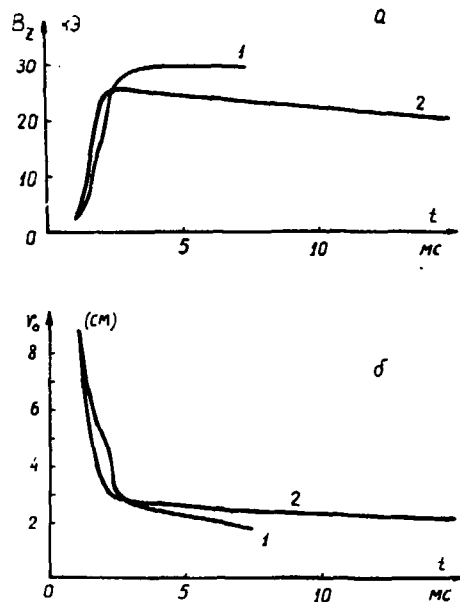


Рис.3. Магнитное поле, сопутствующее электронному кольцу /а/, и изменение его радиуса во времени /б/.

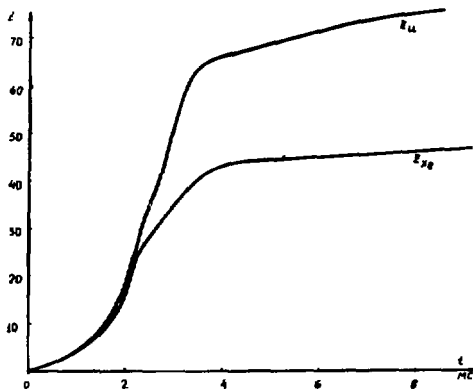


Рис. 4. Изменение среднего заряда накопленных ионов Хе и U в электронном кольце.

Зависимости $V_z(t)$ и $r_0(t)$ показаны на рис. 3а и 3б кривыми 1. Там же для сравнения представлены зависимости $V_z(t)$ и $r_0(t)$ в случае, когда КДП /6/ выключены /кривые 2/. Этот случай соответствует максимальной компрессии электронных

колец, исследовавшейся на прототипе КУТИ^{16/} /при $t_{\max} r_0 = 2,8$ см, далее токи в III ступени экспоненциально падают, радиус кольца уменьшается за счет синхротронного излучения/. На рис. 4 изображен рост среднего заряда накопленных ионов на примере Хе и U при $N_0 = 10^{18}$.

3. Предложенная система позволяет без изменения общей схемы формирования электронных колец в коллективном ускорителе уменьшить большой радиус электронного кольца примерно вдвое. Одновременно малые размеры кольца изменяются за счет радиационного трения пропорционально $r_0^{1/2} / 3/$. Уменьшение размеров электронного кольца и рост среднего заряда накопленных ионов более чем в два раза увеличивает максимально возможный набор энергии электронно-ионным кольцом при ускорении не менее чем в 5 раз.

Необходимо отметить, что должно наблюдаться некоторое уменьшение малых размеров электронного кольца за счет роста частот бетатронных колебаний, вызванного увеличением ионного заряда в кольце. При этом одночастичные резонансы бетатронных колебаний возникать не будут, т.к. безразмерные частоты бетатронных колебаний ν_r и $\nu_z > 1$. С другой стороны, рассеяние электронов на накопленных ионах увеличит поперечные фазовые объемы в 1,5-2 раза^{18/}, что приведет к незначительному увеличению малых размеров кольца. Эти вопросы, а также возможность возникновения когерентных дипольных неустойчивостей типа "змеяка" выходят за рамки данной работы и поэтому детально не обсуждаются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. Атомиздат, М., 1979.
2. Ширков Г.Д., Перельштейн Э.А. ОИЯИ, 9-80-124, Дубна, 1980.
3. Казаринов Н.Ю., Перельштейн Э.А., Ширков Г.Д. ЖТФ, 1980, №50, с. 549.
4. Пеллегрини К. В кн.: Труды II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. "Наука", М., 1972, т. 1, с. 213.
5. Коломенский А.А. Препринт ФИАН, 155, 1970.
6. Саранцев В.П. и др. ОИЯИ, Р9-10917, Дубна, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
12 января 1981 года.