

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

2384 / 2-80

2/6-80
9-80-124

Э.А.Перельштейн, Г.Д.Ширков

О НАКОПЛЕНИИ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
В ЭЛЕКТРОННЫХ КОЛЬЦАХ
КОЛЛЕКТИВНОГО УСКОРИТЕЛЯ

1980

В последние два года был проведен ряд успешных экспериментов по ускорению ионов различных газов вплоть до Хе на прототипе коллективного ускорителя тяжелых ионов /КУТИ/ ОИЯИ /1,2/. При работе КУТИ накопление ионов Ag, Kr и Хе происходило, как правило, из импульсной струи нейтральных атомов газодинамического источника /ГДИ/. Если накопление ионов газообразных элементов в принципе возможно из остаточного газа в камере адгезатора, то для получения ионов таких элементов, как Cu, Pb, U и т.д., требуется струйный источник нейтральных атомов этих элементов.

Для эффективной работы источника и минимального ухудшения вакуума в камере ускорителя необходимо впрыскивать импульсную струю нейтральных атомов в сжатое кольцо.

При накоплении ионов в электронных кольцах приходится учитывать возможность увеличения поперечного фазового объема кольца за счет рассеяния электронов на остаточном газе и накопленных ионах /3/. Электроны кольца рассеиваются главным образом на ядрах ионов и атомов, и величина рассеяния пропорциональна заряду ядра. Без учета разброса электронов по продольным энергиям, аналогично /4/, можно получить для увеличения фазового объема

$$\frac{dE_{r,z}}{dt} = \frac{d}{dt} (\gamma \omega_{r,z} a_{r,z}^2) = \frac{\gamma}{\omega_{r,z}} S, \quad /1/$$

где γ - релятивистский фактор электронов, a_r и a_z - среднеквадратичные полуразмеры кольца в радиальном и аксиальном направлениях, ω_r и ω_z - частоты собственных колебаний электронов. Для постоянной плотности и совпадения размеров сечений электронных и ионных колец интеграл столкновения

$$S = \frac{r_0^2 c^3}{4\pi a_r a_z R \gamma^2} [N_i (I^2 + I - Z) \ln \frac{137\gamma}{(I-Z)^{1/3}} + Z^2 \ln \left(\sqrt{\frac{2}{a_r^2 + a_z^2}} \frac{a_r a_z}{a_0} \right) + N_0 I (I + 1) \ln \frac{137\gamma}{I^{1/3}}] I,$$

здесь $r_0 = 2,82 \cdot 10^{-13}$ см, $a_0 = 0,511 \cdot 10^{-8}$ см, $c = 3 \cdot 10^{10}$ см·с⁻¹, R - большой радиус кольца; Z , N_i и N_0 - соответственно средний заряд и общее число ионов, число нейтральных атомов в кольце. Заметим, что диаметр круга с постоянной плотностью $d = 4a$. При $I^2 \gg Z^2$

$$S = \frac{r_0^2 c^3 (N_i + N_0) I (I + 1)}{4\pi a_r a_z R \gamma^2} \ln \frac{137\gamma}{I^{1/3}}.$$

Если накопление ионов происходит из остаточного газа плотностью n_0 во время формирования кольца, то суммарное число нейтральных атомов и ионов в кольце оценивается величиной

$$N_i + N_0 = (\sigma_0 N_e c t + V) n_0,$$

где σ_0 - полное сечение ионизации нейтральных молекул /атомов/ электронным ударом, N_e - число электронов в кольце.

Из /1/ можно найти относительное увеличение размеров кольца за счет рассеяния электронов:

$$\frac{a'_{r,z}}{a_{r,z}} = \sqrt{\frac{E_{r,z}}{E_{r,z}^0}},$$

$$E_{r,z}^0 = \gamma^0 \omega_{r,z}^0 a_{r,z}^0{}^2, \quad a_{r,z} = \sqrt{\frac{E_{r,z}^0}{\gamma \omega_{r,z}}}.$$

$$E_{r,z} = E_{r,z}^0 + \int \frac{\gamma \delta}{\omega_{r,z}} dt.$$

При расчетах и оценках будем использовать численные значения величин, приблизительно соответствующие параметрам КУТИ ОИЯИ /5/: в начале сжатия кольца ($t=0$) $R^0 = 35$ см, $\gamma^0 = 4,2$, $a_r^0 = a_z^0 = 0,9$ см, $N_e = 10^{18}$; в конце сжатия $t = 2,5$ мкс/ $R = 3,5$ см, $\gamma = 38$, $a_r = a_z = 0,1$ см. Для указанных параметров /при общем времени жизни кольца 3 мс/ при накоплении ионов Хе из остаточного газа получаем

$$\int_0^{3\mu\text{с}} \frac{\gamma \delta}{\omega_{r,z}} dt = \frac{n_0}{\nu_{r,z}},$$

где $\nu_{r,z} = R \omega_{r,z} / c$.

В коллективных ускорителях эффективным является ускорение электронных колец с фактором нейтрализации $f = 0,1 \div 0,3$. Для таких f с учетом собственных полей ионов ν_r и ν_z мало меняются в процессе сжатия кольца в КУТИ ОИЯИ и составляют $\nu_r^2 = 0,8 \div 0,9$; $\nu_z^2 = 0,1 \div 0,2$. В этом случае при давлении Хе в камере адгезатора $5 \cdot 10^{-9}$ Тор E_z возрастает приблизительно на 50% и соответственно a_z - на 25%.

Если накопление ионов происходит из импульсной струи нейтрального газа, то общее число накапливаемых "нужных" ионов в кольце после окончания струи остается постоянным. В этом случае образующиеся из остаточного газа ионы имеют $I < 10$ и к увеличению размеров практически не приводят, тогда

$$S = 3 \cdot 10^4 N_i I^2.$$

Время, в течение которого можно удерживать кольцо с ионами без заметного увеличения фазового объема кольца, должно быть равным

$$t \ll \frac{10^{18}}{N_i I^2}. \quad /2/$$

Условие /2/ для Хе ($I=54$) при $N_i = 10^{11}$ дает $t \ll 30$ мс; для U ($I=92$) при $N_i = 5 \cdot 10^{10}$ - $t \ll 25$ мс. Кроме того, при накоплении ионов из струи, длительность которой значительно меньше общего времени накопления, постоянное образование малозарядных ионов из нейтральных атомов не происходит, поэтому практически отсутствуют ионы, заряд которых значительно меньше среднего заряда ионов в кольце в данный момент, и это приводит к уменьшению дисперсии по зарядам /6/. Отсюда видно, что накопление ионов в электронных кольцах коллективного ускорителя предпочтительнее из импульсной струи, чем из остаточного газа.

При работе источника нейтральных атомов часть атомов не успевает ионизироваться или проходит мимо и неизбежно ухудшает вакуум в камере ускорителя. Можно ввести среднюю длину l свободного пробега нейтрального атома в кольце. Для кольца объемом V и скорости струи u

$$l = Vu / \sigma_0 N_e c.$$

Если источник дает аксиально симметричную, непрерывную по азимуту струю со средней плотностью n_0 , радиальной шириной $d \geq 4a$, длительностью t , то общее число атомов, не захваченных кольцом, приближенно можно считать равным

$$N = 2\pi R u n_0 t (d - 4a e^{-l/\pi a}).$$

При более сложной геометрии источника, имеющего, например, несколько отдельных струй, число N оценивается также без особого труда. Отсюда видно, что для повышения эффективности работы источника нейтральные атомы должны почти полностью захватываться в кольцо, чтобы не ухудшать вакуум в камере адгезатора; с другой стороны, для уменьшения поперечных размеров ионной компоненты кольца следует обеспечить равновероятное образование ионов по сечению кольца /7/, т.е. ослабление потока нейтральных атомов должно быть небольшим. Эти требования выполняются при $l \sim 4a$. Наиболее оптимальным является источник, у которого $d \ll 4a$ и за время действия струи большой радиус кольца R остается постоянным или меняется на величину $\Delta R < 4a$. Тогда $N = 2\pi R u n_0 t d (1 - e^{-l/\pi a})$. Если $d \geq 4a$, то требуется $d = \Delta R + 4a$. Вакуум в адгезаторе ухудшается с повышением цикличности работы ускорителя. Так, ГДИ прототипа КУТИ дает струю атомов Хе с диаметром $d = 1$ см и скоростью $u = 3 \cdot 10^4$ см \cdot с $^{-1/8}$. При ускорении ионов Хе необходимо иметь

$N_1 \sim 10^{11}$. Если струя попадает в электронное кольцо с $R=5$ см, $a \approx 0,1$ см, то $\ell \approx 0,3$. В этом случае $N \approx 3,0 \cdot 10^{11}$. Объем адгезатора $\sim 10^5$ см³. Таким образом, при работе ускорителя с частотой 50 Гц вакуум в камере адгезатора ухудшается за счет работы ГДИ на $4 \cdot 10^{-9}$ Тор \cdot с⁻¹. Для получения нейтральных атомов U необходим источник другого типа, например, плазменный /9/, скорость струи которого $1-2 \cdot 10^5$ см \cdot с⁻¹. В этом случае $\ell \gg a$ и, хотя для загрузки кольца необходимо меньшее количество ионов, вакуум может ухудшаться еще быстрее. Зная эффективность и требуемое число ионов для оптимальной загрузки электронных колец, можно определить необходимое число атомов, поступающее в течение одного импульса в камеру адгезатора. Численный расчет накопления ионов Xe и U проводился для импульсной струи длительностью 0,25 мс при наличии остаточного газа (N_2) в камере КУТИ. Необходимо отметить, что при учете в расчетах ионной фокусировки кольца при накоплении ионов /7/ получаются значительно меньшие значения поперечного сечения кольца по сравнению с измеренными на прототипе КУТИ /10,11/. По-видимому, существуют какие-то неучтенные эффекты /например, когерентные неустойчивости/, компенсирующие уменьшение малых размеров кольца за счет ионного заряда. По этой причине расчеты проводились без учета собственных полей электронного и ионного кольца и считалось, что $a_r = a_z = R/40$, это приблизительно соответствует измеренным значениям. Не рассматривались также ион-ионные взаимодействия, так как, согласно /12/, они несущественны при накоплении тяжелых ионов. Общее время сжатия кольца $\sim 2,5$ мс, далее размеры считались постоянными. Источник начинает работать при $t = 1,75$ мс. В рамках принятой модели расчетное число ионов пропорционально общему числу нейтральных атомов из источника N_{uc} . При параметрах струи источника, приведенных выше, число ионов Xe $N_1 = 0,3 N_{uc}$ при $N_e = 10^{13}$ и $N_1 = 0,21 N_{uc}$ при $N_e = 5 \cdot 10^{12}$. Для урана $N_1 = 0,19 N_{uc}$ при $N_e = 10^{13}$ и $N_1 = 0,12 N_{uc}$ при $N_e = 5 \cdot 10^{12}$. В расчетах использовались сечения электронной ионизации, получившиеся в результате сложения сечений оже-ионизации из работы /13/ с сечениями прямой ионизации из работы /14/. Сечения двойной ионизации использованы из /14/. Число ионов азота при давлении остаточного газа $5 \cdot 10^{-9}$ Тор составляет $2,1 \cdot 10^{11}$ при $t = 2,5$ мс; $3,4 \cdot 10^{11}$ при $t = 5$ мс для $N_e = 10^{13}$ и $1,1 \cdot 10^{11}$ при $t = 2,5$ мс; $2,0 \cdot 10^{11}$ при $t = 5$ мс для $N_e = 5 \cdot 10^{12}$. Основные результаты расчетов приведены на рис. 1 и 2. Сплошные кривые соответствуют $N_e = 10^{13}$, пунктирные — $N_e = 5 \cdot 10^{12}$. На рис. 1 изображено изменение среднего заряда ионов Z азота, ксенона и урана в электронном кольце. Видно, что средний заряд Z сильно зависит от числа электронов в кольце. На рис. 2 представлено изменение дисперсии ионов по зарядам. Дисперсия для ионов азота не приведена, т.к. для ее вы-

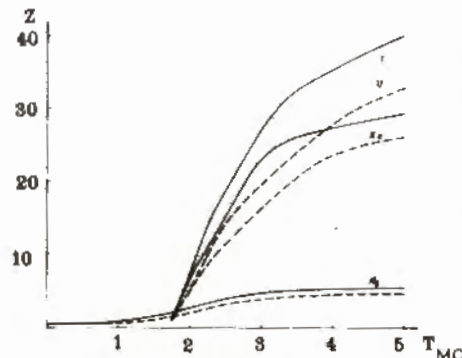


Рис. 1. Изменение среднего заряда ионов азота, ксенона и урана в электронном кольце в процессе накопления.

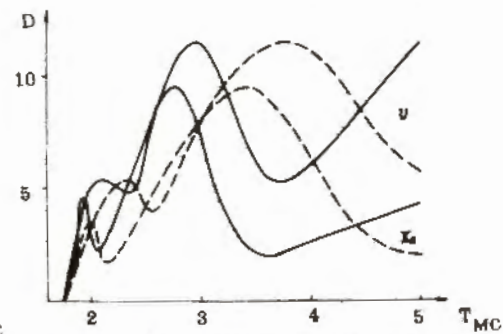


Рис. 2. Изменение дисперсии ионов ксенона и урана по зарядам в электронном кольце в процессе накопления.

числения необходимо учитывать ион-ионные взаимодействия. Такие расчеты были проделаны в работе /15/.

Характер изменения дисперсии ионов по зарядам для тяжелых элементов связан с сильной зависимостью полного сечения ионизации от номера электронной оболочки атома.

В заключение авторы выражают благодарность Б.А.Шестакову за ценные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долбилов Г.В. и др. ОИЯИ, Р9-11191, Дубна, 1978.
2. Долбилов Г.В. и др. ОИЯИ, Р9-12414, Дубна, 1979.
3. Иовнович М.Л., Фикс М.М. ОИЯИ, Р9-4849, Дубна, 1969.
4. Казаринов Н.Ю., Перельштейн Э.А. ОИЯИ, Р9-11916, Дубна, 1978.
5. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. Атомиздат, М., 1979.
6. Георге В. и др. ОИЯИ, Р9-6555, Дубна, 1972.
7. Казаринов Н.Ю., Перельштейн Э.А., Ширков Г.Д. ОИЯИ, Р9-12719, Дубна, 1979.
8. Боровков И.С. и др. IV Всесоюзная конференция по динамике разреженного газа. Аннотации докладов. Изд-во ЦАГИ, М., 1975, с.113.
9. Георге В. и др. ОИЯИ, Р9-9999, Дубна, 1976.
10. Саранцев В.П. и др. ОИЯИ, Р9-10054, Дубна, 1976.
11. Саранцев В.П. и др. ОИЯИ, Р9-10917, Дубна, 1977.

12. Ширков Г.Д. ОИЯИ, Р9-12055, Дубна, 1978.
13. Salop A. Phys.Rev., 1973, A8, p.3032; 1974, A9, p.2496.
14. Зиберт Х.-У. и др. ОИЯИ, Р9-10197, Дубна, 1976.
15. Перельштейн Э.А., Ширков Г.Д. ОИЯИ, Р9-11412, Дубна, 1978.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 февраля 1980 года.