



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

1989

P9-89-600

Г. Д. Ширков

УПРУГИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ ИОНОВ
В ИСТОЧНИКАХ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

Направлено в "Journal de Physique"

1989

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для получения многозарядных ионов используют источники электронно-лучевые (EBIS)^{/1/} и на электронно-циклотронном резонансе (ECR)^{/2/}. Недавно предложен новый тип источника с электронными кольцами (ERIS)^{/3,4/}. Многозарядные ионы используются для последующего ускорения в ускорителях тяжелых ионов или в исследованиях по физике электронной оболочки сильноионизированных атомов. Усилия исследователей направлены на повышение зарядностей и интенсивностей пучков ионов. В EBIS-, ERIS- и ECR-источниках многозарядные ионы образуются в результате последовательной ионизации электронным ударом в течение времени удержания в электронном пучке (кольце) или в находящейся в магнитной ловушке плазме.

За последние годы вопросам ионизации и перезарядки ионов было посвящено много работ и обзоров^{/5/}.

Упругие кулоновские столкновения заряженных частиц в плазме достаточно хорошо изучены в связи с работами по термоядерному синтезу, и уже вошли в учебники^{/6,7/}. В то же время эти вопросы еще не в полной мере учтены при описании процессов в источниках многозарядных ионов. Учет упругих столкновений заряженных частиц, вероятно, может объяснить некоторые наблюдаемые явления и указать пути повышения эффективности ионных источников.

2. ОБЩИЕ УРАВНЕНИЯ

Рассеяние электронного пучка на накопленных ионах, остаточном газе или твердой мишени ведет к увеличению поперечных размеров и эмиттанса пучка^{/8,9/}. При кулоновских столкновениях с электронами ионы приобретают дополнительный импульс. Наиболее вероятны столкновения с большими прицельными параметрами и рассеяние электронов на малые углы. В результате ионы увеличивают энергию поперечных колебаний в потенциальной яме электронного заряда.

Скорость измерения энергии E_1 ионов с зарядом Z и массой AM определяется из:^{/3/}

$$\frac{dE_1}{dt} = \frac{r_e^2 Z^2 N_e m^2 c^3}{a_e^2 \beta A M} \Lambda, \quad (1)$$

где $\beta = v_e/c$; m , r_e , v_e — масса, классический радиус электронов и их скорость, c — скорость света, a_e — среднеквадратичные поперечные полуразмеры электронного пучка, N_e — средняя погонная плотность электронов, $\Lambda = 10 \div 20$ т.н. кулоновский логарифм, зависящий от энергии и плотности электронов и размеров электронного пучка.

Ионы образуются в электронных пучках в результате ионизации электронным ударом нейтральных атомов или молекул, попадающих в пучок. Энергия однозарядных ионов определяется электрическим потенциалом пучка в месте рождения иона и, как правило, много больше энергии нейтралов. Оказываясь в потенциальной яме пучка, ионы начинают совершать колебания и могут подвергаться дальнейшей ионизации, увеличивая свой заряд и, следовательно, энергию. В электронном пучке радиуса a с постоянной плотностью в сечении потенциал электрического поля в зависимости от расстояния от оси r определяется как

$$U = \frac{e N_e r^2}{a^2}, \quad (2)$$

где e — заряд электрона.

Если пучок имеет плотность, спадающую к краю, например, распределение Гаусса^{/3/}, то

$$U = -e N_e \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k k!} \left(-\frac{r^2}{2a_e^2}\right)^k. \quad (3)$$

Потенциалы (2) и (3) для пучков с равными N_e и $a = \sqrt{2}a_e$ в центре пучков совпадают, а при $r \leq a$ отличаются менее чем на 20%. Нейтрализация электронного заряда ионами уменьшает глубину потенциальной ямы. Средняя полная энергия поперечных колебаний ионов с зарядом $Z \gg 1$ в электронном пучке с постоянной плотностью сечения определяется как^{/3,9/}

$$\bar{E}_1 = \sqrt{\frac{Z}{\pi}} N_e r_e m c^2. \quad (4)$$

В электронном пучке с гауссовской плотностью в сечении средняя энергия оценивается величиной, не зависящей от заряда ионов^{/3/}

$$\bar{E}_1 \approx 2 N_e r_e m c^2. \quad (5)$$

Величины (4) и (5) получены без учета фактора нейтрализации электронного заряда ионами и различных возможных процессов, увеличивающих энергию ионов, таких, как нагрев электронами или электронно-ионные неустойчивости.

В результате столкновений с электронами энергия ионов увеличивается, амплитуды колебаний растут и могут превысить размеры электронного пучка. Было показано, что в этом случае ионы большую часть времени проводят вне пучка, мало влияют на электронную компоненту и, с хорошей степенью точности, могут считаться потерянными^{/10/}.

Будем считать, что энергия

$$E_{rp} = Z N_e r_e m c^2 \quad (6)$$

является граничной для ионов. Ионы с $E_1 > E_{rp}$ имеют амплитуду колебаний в равномерно заряженном пучке больше его размеров, а в пучке с гауссовской плотностью больше, чем $1,65 a_e$.

Накапливаясь в электронных пучках, ионы взаимодействуют друг с другом. Пусть в пучке имеются частицы с плотностью n_1 , зарядом Z_1 , массой $A_1 M$ и энергией E_1 , и частицы с n_2 , Z_2 , $A_2 M$ и E_2 . Тогда скорость изменения энергии E_1 частиц первого сорта в результате столкновений с частицами второго сорта^{/7/}

$$\frac{dE_1}{dt} = 4\pi n_2 Z_1^2 Z_2^2 r_e^2 m^2 c^4 \frac{\sqrt{A_1 A_2} (E_2 - E_1)}{\sqrt{M} (A_1 E_2 + A_2 E_1)^{3/2}} \Lambda. \quad (7)$$

Для E_2 изменение энергии определяется аналогично. В результате столкновений, за время $t \gg E_1 / \frac{dE_1}{dt}$, $E_2 / \frac{dE_2}{dt}$ распределения ионов превращаются в трехмерное распределение Максвелла с общей температурой частиц или одинаковой энергией по трем степеням свободы ионов всех типов. Ионы большей энергии остынут, а меньшей нагреются.

Условия возникновения неустойчивостей и вызванные этим изменения энергии компонент пучка выходят из круга рассматриваемых здесь вопросов.

Рассмотрим более подробно несколько конкретных случаев.

3. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ

EBIS представляет собой линейный непрерывный равномерно заряженный в сечении электронный пучок.

Е.Д.Донцом в ионизаторе КРИОН-2, с плотностью тока до 1 кА/см² за время 5 ÷ 10 с были получены ионы Kr^{36+} и $Xe^{52+/1}$. Основным недостатком источников типа EBIS, при времени удержания в несколько секунд, являются потери многозарядных ионов. В пучке остается $10^{-3} - 10^{-4}$ от начального числа ионов. Причиной потерь может служить нагрев со стороны электронов. Выражение (1) для источника КРИОН-2 ($E_e = 20$ кэВ, $I = 0,2$ А, $a = 0,15$ мм) дает, что за ~ 1 с ионы ксенона увеличивают энергию выше граничной (6) и уходят из пучка. Приводить к нагреву ионов могут также возникающие неустойчивости.

Охлаждение многозарядных ионов может быть осуществлено путем введения в пучок малозарядных ионов легких элементов^{/11/}. Энергия ионов в пучке с равномерной плотностью в сечении зависит от заряда (4). Кроме того, согласно (1), электроны быстрее нагревают многозарядные ионы. В результате столкновений ионов разных типов между ними происходит выравнивание энергий. Пусть тяжелые ионы имеют энергию E_1 , легкие — E_2 . После выравнивания энергий установится

$$\bar{E} = \frac{E_1 N_1 + E_2 N_2}{N_1 + N_2}.$$

Если подобрать число и сорт легких ионов таким, чтобы $\bar{E} > E_{гр2}$, где $E_{гр2}$ определяется из (6), то легкие ионы, охладив тяжелые, будут теряться из пучка и уносить с собой энергию. В стационарном случае энергия теряемых ионов должна быть равна энергии, получаемой ионами в результате нагрева. Одновременно в пучок вводятся новые порции легких ионов с низкой энергией для компенсации количества ионов, ушедших из пучка. Легкие ионы могут образовываться из остаточного газа в трубке дрейфа пучка специально подобранного состава и давления, либо вводиться туда порциями в виде ионов.

Возьмем для примера источник с параметрами: $E_e = 70$ кэВ, $I = 0,5$ А, $a = 0,10$ мм. Выражение (1) показывает время нагрева многозарядных ионов Хе до энергий выше граничной (6) менее 1 с. Время выравнивания температур с ионами, например, C^{3+} , составляет $\sim 10^{-4}$ с. При длине ускорительной трубки 1 м и числе ионов ксенона $2 \cdot 10^8$ требуется каждые 10 мс инжектировать $3 \cdot 10^7$ ионов C^{3+} . Если нагрев Хе происходит не только со стороны электронов, то число подаваемых ионов C^{3+} должно быть соответствующим образом увеличено.

Очевидно, для охлаждения ионов тяжелее Кг наиболее предпочтительными являются ионы С, N, O. Более легкие ионы менее интенсивно охлаждают тяжелые, а более тяжелые имеют граничную энергию, мало отличающуюся от граничной энергии ионов рабочего вещества.

В Дубне на установке КРИОН-2 Е.Д.Донцом были проведены первые успешные эксперименты по охлаждению ионов Кг. Выход ионов Кг удалось увеличить примерно в 10 раз^{/12/}.

Предложенный метод позволит также уменьшить эмиттанс пучка ионов, получаемых в EBIS.

4. ЭЛЕКТРОННО-КОЛЬЦЕВОЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ

В настоящее время разрабатываются проекты использования релятивистских электронных колец коллективного ускорителя в качестве источника многозарядных ионов^{/3,4/}. В кольцах с числом электронов $\sim 5 \cdot 10^{12}$, радиусом $R = 2$ см, $a_e = 0,1 - 0,15$ см за время ~ 100 мс предполагается получать ионы до Xe^{50+} числом до 10^{10} в цикле. Многозарядные ионы, удерживаемые электронным кольцом, могут быть использованы для исследований по физике электронных оболочек высокоионизированных ионных состояний методами рентгеновской спектроскопии высокого разрешения. Однако естественные колебания ионов в кольце с током электронов 1 - 2 кА приводят к доплеровскому уширению излучаемых линий и снижают точность измерений. Плотность электронов в сечении кольца близка к распределению Гаусса. Из (3) имеем среднюю кинетическую энергию ионов Xe^{50+} $E_1 = 5,5 \cdot 10^4$ эВ. Энергия равномерно распределена между двумя поперечными степенями свободы. Доплеровский сдвиг, при наблюдении рентгеновского излучения кольца в плоскости вектора скорости ионов, достигает величины $\Delta E/E_k = v_1/c = 0,09\%$. Энергия излучения линий $K\alpha_1$ и $K\beta_1$ у Хе $E_k = 30$ кэВ, следовательно $\Delta E \approx 25$ эВ, и это позволяет получить разрешение выше, чем разница в энергиях линий ионов соседних зарядностей, которая равна $50 \div 100$ эВ. Проведение измерений в направлении, перпендикулярном малому сечению кольца, практически исключает доплеровский сдвиг.

Столкновение ионов друг с другом приводит к перераспределению энергии между тремя степенями свободы. Для параметров электронного кольца EBIS и числа ионов ксенона $N_i = 10^{10}$ это произойдет за время ~ 1 мс. В результате исчезнет направление наблюдения без доплеровского сдвига, а максимальный сдвиг уменьшится на 20%.

Реально в электронных кольцах существует целый ряд процессов, приводящих к нагреву ионной компоненты. Помимо столкновений с

электронами, влияние которых за время до 100 мс невелико, нагрев ионов может возникать из-за развития в течение времени формирования и удержания кольца различных видов неустойчивостей, например, дипольных типа "змеяка". В результате часть ионов может быть потеряна из кольца, а оставшиеся заполняют все энергетическое пространство в потенциальной яме кольца. В этом случае средняя энергия ионов будет

$$\bar{E} = E_{rp} / 2 = Z N_e r_e m_e c^2 / 2.$$

Уширение достигнет величины ~100 эВ и сделает невозможным разделение линий соседних зарядностей.

Для охлаждения тяжелых многозарядных ионов могут быть использованы легкие малозарядные ионы. Пусть в кольце 10^{10} ионов Xe^{50+} . Если инжектировать в него атомы гелия (из остаточного газа в вакуумной камере или специальной струей нейтрального газа), то за ~100 мкс образуются ионы He^{2+} с энергией $20 \div 30$ кэВ. Число ионов гелия можно регулировать парциальным давлением гелия в остаточном газе или плотностью и длительностью нейтральной струи. Согласно (7), при числе ионов гелия $5 \cdot 10^{11}$, за время $10 \div 20$ мс энергии ионов выравняются и установятся с учетом перераспределения между тремя степенями свободы, $25 \div 35$ кэВ, и уширение уменьшится до $\Delta E = 15$ эВ. Если предположить возможность потерь легких ионов из электронного кольца, то способом, изложенным для EBIS, удастся охладить тяжелые ионы еще сильнее и уменьшить доплеровский сдвиг до величин $2 \div 5$ эВ, что соответствует разрешению кристалло-дифракционных спектрометров.

5. ИСТОЧНИКИ ИОНОВ НА ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ

ECR-источник представляет собой плазму, удерживаемую в открытой магнитной ловушке. Электронная компонента плазмы нагревается ВЧ полем до энергий в несколько кэВ и удерживается магнитными пробками. Ионы приобретают энергию в результате столкновений с электронами (обычно несколько эВ) и медленно диффундируют из ловушки. Разная скорость диффузии электронов и ионов приводит к появлению электрического заряда и потенциала плазмы. Время удержания и зарядность ионов определяются потенциалом плазмы и энергией ионов^{/15/}.

В последние 3-4 года было экспериментально обнаружено, что добавление в ECR-источник легких ионов приводит к увеличению выхо-

да многозарядных ионов^{/13, 14/}. Причиной этого может служить обмен энергией легкой и тяжелой компонентами в результате упругих ион-ионных столкновений. Пусть в плазме присутствуют ионы двух типов с массовыми числами A_1 и A_2 и зарядами Z_1 и Z_2 ($A_2 < A_1$, $Z_2 < Z_1$). В соответствии с (1) легкие ионы медленнее нагреваются электронами, но столкновение ионов двух типов приводит к выравниванию энергий между ними и охлаждению тяжелой компоненты. При характерных параметрах плазмы в ECR-источнике ($n_e = 10^{11} \div 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $n_i = 10^{10} \div 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $E_1 = 10$ эВ, $Z_1 = 10$, $Z_2 = 3$) из (7) можно получить, что время выравнивания энергий имеет микросекундный масштаб и на несколько порядков меньше характерного времени удержания плазмы. Легкие ионы, забрав энергию тяжелых, быстро уходят из ловушки. Охлажденная тяжелая компонента диффундирует медленнее и успевает набрать больший заряд. Оптимальное отношение зарядов и масс ионных компонент Z_1/Z_2 ; $A_1/A_2 = 3 \div 5$. Совсем легкие ионы, согласно (7), имеют низкую охлаждающую способность, а ионы близкой массы имеют близкую скорость диффузии при равных энергиях. Снижение энергии ионов рабочего вещества вызывает уменьшение энергетического разброса и эмиттанса ионного пучка, получаемого в ECR-источниках.

Наиболее подробное экспериментальное исследование влияния ионов He, O, N, Ne, Ar друг на друга было выполнено в Голландии на ECR-источнике типа MINIMAFIOS^{/13/}. Было получено, в частности, что для получения высоких зарядностей Ar добавление в плазму азота дает больший эффект, чем гелия. В то же время, при получении ионов неона, гелий оказывает большее влияние. С другой стороны, добавление к легким газам тяжелых элементов приводит к уменьшению среднего заряда легкой компоненты. Это также согласуется с нашей моделью.

В RT-ECR-источнике Мичиганского университета^{/14/} были получены данные, позволяющие судить об уменьшении температуры ионов с 11 до 5 эВ при введении ионов гелия, и до 3 эВ при добавлении азота и кислорода. Там же зарегистрировано уменьшение разброса по энергиям полученных ионов Ar⁹⁺ при добавлении в плазму кислорода.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В электронно-ионных пучках и плазме упругое столкновение многозарядных ионов между собой гораздо интенсивнее, чем между электронной и ионной компонентами. Это связано с высоким зарядом ионов и меньшими относительными скоростями движения тяжелых частиц. При получении многозарядных ионов добавление легких ионов с низким зарядом позволяет охлаждать ионы рабочего вещества, увеличи-

вать их эффективное время удержания и уменьшать энергетический разброс.

В статье изложены общие вопросы охлаждения ионов. Конкретные случаи требуют детальных расчетов и экспериментальной проверки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Donets E.D. – *Phys. Scripta*, 1983, v. T3, p. 11.
2. Geller R., Jacquot B. – *NIM*, 1981, v. 184, p. 293.
3. Перельштейн Э.А., Ширков Г.Д. – *ЭЧАЯ*, 1987, т. 18, с. 154; *Particles & Nuclei*, 1987, v. 18, p. 68.
4. Perelstein F.A., Shirkov G.D. – In: *Proc. of Summer School and Int. Symp. on the Phys. of Ionized Gases, Sarajevo*, 1988, p. 148.
5. Janev R.K., Presnyakov L.P. – *Phys. Rep.*, 1981, v. 70, p. 1.
6. Spitzer L. – *Physics of Fully Ionized Gases*. Interscience Publishers, New York, 1962.
7. Longmire C.L. – *Elementary Plasma Physics*. Interscience Publishers, New York, 1963.
8. Lee E.P., Cooper R.K. – *Particle Acceler.*, 1976, v. 7, p. 83.
9. Laslett L.S. – *Preprint ERAN-218, LBL, Berkeley*, 1972.
10. Буляк Е.В., Куршико В.И. – *ЦНИИАтоминформ*, Москва, 1987, 24 с.
11. Донец Е.Д., Ширков Г.Д. – *Авторское свидетельство СССР №1225420*. *Бюлл. ОИПОТЗ*, 1989, №44.
12. Donets E.D. – In: *Abstracts of Int. Conf. on Ion Sources, Berkeley*, 1989, p. 4.
13. Mack M. et al. – In: *Contributed Papers of the 7th Workshop on ECR Ion Sources*, 1986, Jülich, p. 152.
14. Antaya T.A. – *J. de Physique*, 1989, v. 50, Colloque C1, p. C1-707.
15. Jongen Y. – *LC 8001, Univer. Catholique de Louvain (Belgium)*, 1980.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 августа 1989 года.

Ширков Г.Д.

P9-89-600

Упругие столкновения ионов в источниках многозарядных ионов

Рассмотрены упругие кулоновские столкновения электронов с ионами и ионов между собой в электронных пучках и плазме. Обосновано использование легких ионов низких зарядностей для охлаждения многозарядных ионов в электронно-лучевых источниках (EBIS), электронно-кольцевых источниках (ERIS) и источниках на электронно-циклотронном резонансе (ECR). Введение малозарядных ионов в пучок позволит снизить потери многозарядных ионов в EBIS и доплеровское уширение излучения ионов в ERIS. Предложенная модель позволяет объяснить резкое увеличение выхода многозарядных ионов при введении в плазму легких газов, зарегистрированное в экспериментах на ECR-источниках.

Работа выполнена в Общественном научно-методическом отделении ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1989

Перевод А.В.Дмитренко

Shirkov G.D.

P9-89-600

Elastic Ions Collisions in the Multiply Charged Ion Sources

Elastic Coulomb electron-ion and ion-ion collisions in electron beams and plasma are examined. It is shown that resulting from the collisions with electrons, the ions energy increases and they can be lost from the beam, and when different energy ions collide, the energy and temperature alignment take place. The use of low charged light ions for the multiply ions cooling in electron beam ions sources (EBIS), electron ring ion sources (ERIS) and electron cyclotron resonance ion sources (ECRIS) is substantiated. The injection of low charged ions into the beam will permit to decrease the multiply ions losses in EBIS and the Doppler widening of ions radiation decreases in ERIS. The proposed model permits to explain the sharp increase of multiply ions extraction when we inject the light gas in plasma, registered in experiments on ECR sources.

The investigation has been performed at the Scientific-Methodical Division, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1989