

УДК 621.384.6

## Электронно-струнные источники многозарядных ионов с линейной и трубчатой геометрией струны

Д. Е. Донец, Е. Д. Донец, Е. Е. Донец, В. М. Дробин, В. В. Сальников,  
Е. М. Сыресин, А. В. Шабунов, В. Б. Шутов

*Для формирования интенсивных пучков многозарядных ионов в ряде лабораторий используют электронно-струнные ионные источники, впервые предложенные и реализованные в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ). В этом источнике электроны совершают около 500—1000 осцилляций между электронной пушкой и отражательным электродом, что приводит к созданию плотной электронной плазмы (электронной струны) при низкой интенсивности электронов, эмитируемых с катода. В результате этого мощность источника уменьшается на два—три порядка по сравнению с электронно-лучевыми источниками (ЭЛИ). В электронно-струнных ионных источниках сформированы интенсивные пучки многозарядных ионов, таких как  $Ar^{16+}$ ,  $Fe^{24+}$  и  $Au^{51+}$ , с током 100—200 мкА при длительности импульса 8 мкс. Для увеличения емкости ионной ловушки в ОИЯИ предложено использовать трубчатую геометрию электронной струны, что позволит получать пучки многозарядных ионов с импульсным током до 10 мА.*

PACS: 41.75.-i; 52.50.-b

*Ключевые слова:* многозарядный ион, ионный источник, электронный пучок, катод, электронная струна, плазма.

### Введение

Электронно-лучевые источники, реализованные в ранних работах в ОИЯИ [1], широко используются в ведущих ускорительных центрах для получения как высоко-зарядных ионов, так и полностью ободранных ядер. Для глубокой ионизации многозарядных ионов в них формируются пучки с энергией электронов около 10 кэВ и токами порядка 1 А. Электронно-лучевые источники ионов работают в импульсном режиме и применяются главным образом в качестве инжекторов в синхротронах. Они обладают высоким ионным импульсным током и относительно низким средним током. Ионный ток в ЭЛИ может быть увеличен за счет повышения плотности или тока электронов. Однако мощность, запасенная в стационарном электронном пучке, в этом случае начинает достигать сотни киловатт. В результате ионные ЭЛИ при предельных мощностях могут работать либо в импульсном режиме, либо в режиме с рекупера-

цией энергии, что порождает дополнительные проблемы.

Электронный пучок в ЭЛИ формируется в сильном продольном магнитном поле. Ионы удерживаются в поперечном направлении пространственным зарядом электронного пучка, а в продольном направлении — с помощью потенциальных барьеров, создаваемых специальными электродами.

Ионы накапливаются в ЭЛИ до тех пор, пока их пространственный заряд не составит 70—80 % от пространственного заряда электронного пучка.

Таким образом, суммарный заряд электронов в ионном источнике  $Q = 10^{13} \cdot I_A \cdot L_M / E_{eV}^{1/2}$  определяет емкость ловушки, здесь  $L_M$  — длина электронно-оптической системы ионного источника (м);  $I_A$  — ток электронного пучка (А);  $E_{eV}$  — энергия электронов (эВ). Типичное значение суммарного заряда электронов составляет 15 нК при  $E = 10$  кэВ,  $I = 1$  А и  $L = 1$  м.

Для снижения на два—три порядка мощности электронных пучков при близком суммарном заряде электронов в системе в ОИЯИ в 1994 г. предложен и реализован электронно-струнный ионный источник (ЭСИС) многозарядных ионов [2, 3]. В электронной пушке такого источника формируется электронный пучок с малым током порядка 1 мА, энергией электронов 2—4 кэВ и мощностью ~ 5 Вт. С помощью специального электрода электроны в нем отражаются от потенциального барьера рефлектора и снова возвращаются в ис-

Донец Денис Евгеньевич, инженер.  
Донец Евгений Денисович, и. о. главного научного сотрудника.  
Донец Евгений Евгеньевич, и. о. начальника сектора.  
Дробин Валерий Михайлович, старший научный сотрудник.  
Сальников Владимир Викторович, механик.  
Сыресин Евгений Михайлович, помощник директора.  
Шабунов Алексей Викторович, начальник КБ.  
Шутов Виталий Борисович, старший научный сотрудник.  
Объединенный институт ядерных исследований.  
Россия, 141980, Дубна, Московской обл., ул. Ж. Кюри, 6.  
E-mail: syresin@nusun.jinr.ru

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2009 г.

точник. В результате они совершают несколько сот продольных осцилляций через электронно-оптическую систему (ЭОС) источника, прежде чем покидают его в поперечном направлении. В итоге в источнике формируется плотное плазменное образование осциллирующих электронов, названное линейной электронной струной.

Несмотря на сниженные мощности электронных пучков на два—три порядка, в ЭСИС удается сформировать электронную струну с плотностью, близкой к плотности электронов в ЭЛИ. Образование электронной струны обусловлено развитием неустойчивости электронной плазмы, приводящей к уширению энергетического спектра осциллирующих электронов. Формирование электронов с широким энергетическим спектром обеспечивает самостабилизацию неустойчивости и фазовый переход в новое стационарное состояние при высокой плотности электронов в струне. В ходе этих экспериментов в ЭСИС сформированы интенсивные пучки многозарядных ионов, таких как  $\text{Ar}^{16+}$ ,  $\text{Fe}^{24+}$  и  $\text{Au}^{51+}$ , с током 100—200 мкА при длительности импульса 8 мкс [4, 5].

Для увеличения емкости ионной ловушки в ОИИИ предложено использовать трубчатую геометрию электронной струны (ТЭСИС) [6—8], с этой целью формируется трубчатый электронный пучок с помощью кольцевого катода. В результате число накопительных электронов в трубчатой струне возрастает в  $N_{\text{ТЭСИС}}/N_{\text{ЭСИС}} \approx 25\text{—}50$  раз. Реализация ТЭСИС позволит получать пучки многозарядных ионов, таких как  $\text{Ar}^{16+}$  и  $\text{Fe}^{24+}$ , с импульсным током до 10 мА. В настоящее время ведутся работы над созданием такого источника [9, 10], и планируется его завершить в 2010 г.

### Электронно-струнные ионные источники

Электроны формируются в электронной пушке, расположенной в слабом магнитном поле  $B_g = B/R = 1,5$  кГс (здесь  $B = 3$  Т — магнитное поле в центральной части ионной ловушки;  $R = 20$  — пробочное отношение). Диаметр катода составляет ~1 мм, при этом катод работает в режиме ограниченной эмиссии. Электроны, сформированные в пушке, транспортируются вдоль силовых линий продольного магнитного поля до рефлектора, где они отражаются от его потенциального барьера. Величина потенциала рефлектора обычно на 2—3 кВ больше величины потенциала катода.

Возвратившись в электронную пушку, электроны отражаются уже от потенциального барьера катода. В результате многократных отражений от потенциальных барьеров в пушке и рефлекторе электроны совершают продольные осцилляции в системе. Это происходит до тех пор, пока они не

покинут источник в поперечном направлении за счет радиальной диффузии, возникающей путем упругого рассеяния электронов на потенциальных барьерах рефлектора и пушки.

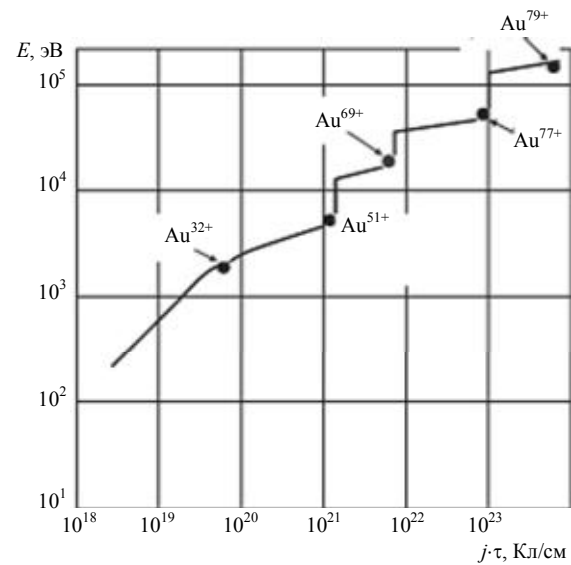


Рис. 1. Заряд ионов как функция энергии электронов и произведения плотности тока электронов и времени удержания ионов

Рабочий газ инжектируется в центральную область, где создаются потенциальные барьеры для продольного удержания ионов, образующихся при ионизации атомов этого газа. Заряд ионов определяется энергией электронов  $E$  и произведением плотности тока в электронной струне на время удержания ионов  $j \cdot \tau$  (рис. 1). Для получения ионов  $\text{Ar}^{16+}$  и  $\text{Fe}^{24+}$  необходимо сформировать электронную струну с плотностью тока  $j \approx 100\text{—}200$  А/см<sup>2</sup> и временем удержания ионов в ней около 1 с. Ионы обычно выводятся в течение 8 мкс через центральное отверстие в электроде рефлектора при выключении потенциала ионного барьера со стороны рефлектора.

### Аспекты формирования электронной струны

Динамика формирования электронной струны в значительной мере определяется рассеянием электронов на потенциальных барьерах в электронной пушке и отражательном электроде [11]. Угол упругого рассеяния электронов равен  $\alpha_{\text{gun}} \cong (r_c/d) \times (\rho/d) \cong 5$  мрад, где  $r_c = 0,5$  мм — радиус катода,  $d$  — катодно-анодный зазор;  $\rho = v/\omega_H \cong 1,5$  мм — ларморовский радиус, рассчитанный по полной энергии;  $\omega_H$  — циклотронная частота электронов.

После магнитной компрессии в сильном магнитном поле угол рассеяния увеличивается до величины  $\alpha = \alpha_{\text{gun}} \cdot R^{1/2} \cong 20$  мрад. По мере упругого рассеяния электронов при отражении от потенци-

альных барьеров их среднеквадратичный угловой разброс  $\theta^2$  растет с ростом числа продольных осцилляций электронов  $N_{osc}$ ,  $\theta^2 = 4\alpha^2 N_{osc}$ .

Плотность накопленных электронов в струне определяется двумя процессами: уходом электронов в радиальном направлении из-за диффузии, а также их потерями при захвате в магнитную пробку, когда среднеквадратичный угол рассеяния электронов  $\theta^2$  достигает  $\cong 1$ . Механизм захвата в магнитную пробку, расположенную между катодом и краем соленоида, в основном реализуется для широких электронных струн, когда ларморовский радиус электронов в сильном магнитном поле превосходит радиус пучка  $\rho_b > a$ . Количество накопленных электронов струны в одночастичном приближении определяется соотношением [10]

$$N_e = (I_e L / ve)(1/4\alpha^2) \cong 2 \cdot 10^{10},$$

где  $I_e \cong 200$  мкА — ток инжекции пучка;

$L = 1,2$  м — длина ЭОС.

Число накопленных электронов в значительной мере определяется коллективными эффектами [11], связанными с развитием неустойчивостей в электронной струне. Эффекты приводят к существенному уширению энергетического спектра электронов струны, в результате электроны отражаются далеко от катода и мало влияют на ток эмиссии пучка и работу электронной пушки. Зависимость плотности накопленных электронов от ширины их энергетического спектра показана на рис. 2.

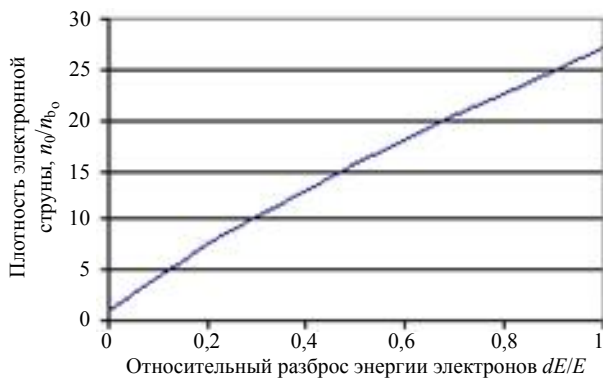


Рис. 2. Зависимость отношения плотностей электронной струны и пучка в режиме “закона 3/2” от относительного разброса энергии электронов струны

При ширине электрического спектра  $\Delta E/E \cong 0,3$ , реализуемой в экспериментах с электронной струной [2, 3], ее плотность превышает в  $n_0/n_b = k = 11,3$  плотность электронного пучка в режиме неограниченной эмиссии (“закон 3/2”). При увеличении энергетического разброса растут плотность накопленных электронов (см. рис. 2) и доля последних с низкой энергией. Оптимальная ширина спектра энергии электронов составляет

$$\Delta E/E \cong J/(eU_s + J) \cong 0,3—0,4,$$

где  $J \cong 2,5—3$  кэВ — потенциал ионизации ионов, таких как  $\text{Ar}^{16+}$  или  $\text{Fe}^{24+}$ ;  $U_s \cong 0,5$  кВ — провисание потенциала, обусловленное пространственным зарядом электронов струны.

Начальная энергия инжектированных электронов при формировании многозарядных ионов с потенциалом ионизации  $J$  близка к величине  $E \cong 2J + eU_s \cong 3—3,5$  кэВ. Число накопленных электронов в струне в зависимости от ширины их энергетического спектра ограничено следующей величиной [10]:

$$N_e \cong k \cdot (I_{b0}/e) \cdot (L/v) \cong 2 \cdot 10^{10},$$

где  $I_{b0} \cong 10$  мА — ток пучка в режиме неограниченной эмиссии;

$k(\Delta E/E) \cong 11$  при  $\Delta E/E \cong 0,3$ .

Максимальное количество электронов в струне определяется первансом дрейфовой камеры электронно-оптической структуры, т. е.

$$N_{\max} = (2U \cdot L / 3e) / (1 + 2 \ln(b/a)) \cong 10^{12},$$

где  $b$  — радиус дрейфовой камеры;

$a$  — радиус электронной струны.

При дальнейшем увеличении числа накопленных электронов в системе возникает виртуальный катод, приводящий к существенному уширению энергетического спектра электронов и формированию струны с большим числом низкоэнергетичных электронов [12]. Такие электроны не дают вклада в ионизацию многозарядных ионов с  $J \cong 2,5—3$  кэВ. Вследствие этого режим с виртуальным катодом является неоптимальным для формирования интенсивных пучков многозарядных ионов.

### Эксперименты по формированию электронной струны

В ходе экспериментальных исследований на ЭСИС “Крион-2” был обнаружен фазовый переход электронной плазмы в новое стационарное состояние со значительным увеличением ее плотности, т. е. переход к так называемой “линейной электронной струне” [2, 3].

Результаты экспериментов по формированию электронной струны для различных токов эмиссии с катода приведены на рис. 3. При малых токах эмиссии (см. рис. 3, а) происходит формирование струны с малым числом накопленных электронов. Динамика накопления электронов струны при большом токе эмиссии (который по-прежнему много меньше, чем ток катода, работающего в режиме неограниченной эмиссии) принципиально изменяется (см. рис. 3, б). На первом этапе (см. рис. 3, б, режим 1) при большом токе эмиссии  $I = 300$  мкА накопление заряда электронов струны реализуется так же, как и для режима с малым то-

ком эмиссии  $I = 50$  мкА. Однако через некоторое время накопление электронов прекращается, что, по-видимому, связано с частичным запираем пушки под действием пространственного заряда уже накопленных электронов. Как видно из рис. 3, б, в дальнейшем (режим 2) в системе возникают высокочастотные колебания, обусловленные коллективными эффектами, связанными с развитием неустойчивости электронной струны. В результате энергетический спектр электронов струны уширяется до уровня  $\Delta E/E \cong 0,3—0,4$ . Это приводит к тому, что электроны струны начинают слабо влиять на ток эмиссии, поскольку отражаются далеко от поверхности катода. Пушка приоткрывается, возрастают ток эмиссии и скорость накопления электронов струны (см. рис. 3, б, режимы 2, 3). По мере накопления электронов на третьей стадии формирования струны возникает самосогласованное состояние, в котором в результате уширения энергетического спектра электронов уровень высокочастотных колебаний заметно снижается (см. режим 3).

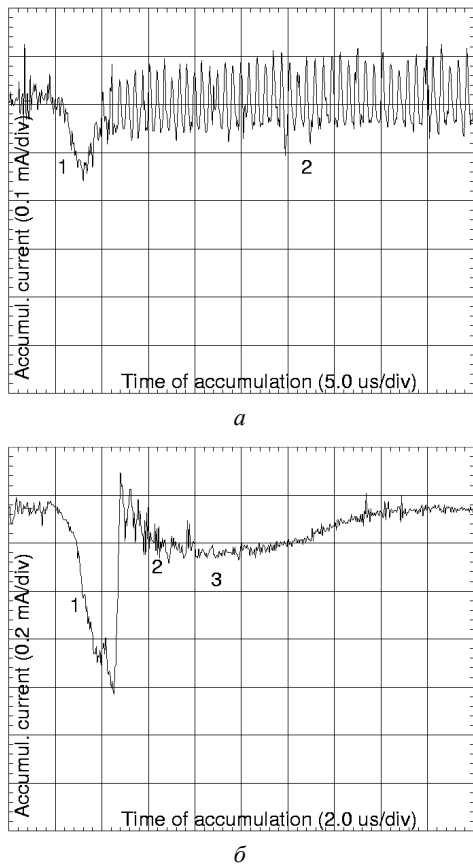


Рис. 3. Зависимость тока накопления электронов струны от времени для тока эмиссии с катода: а —  $I = 50$  мкА; б —  $I = 300$  мкА; 1—3 — режимы работы

Число накопленных электронов в струне составляет  $Q \cong 6$  нК. Накопленный заряд электронов струны  $Q$  в экспериментах пропорционален третьей степени от величины продольного магнитного поля  $Q = aB^3$  [2, 3] (рис. 4).

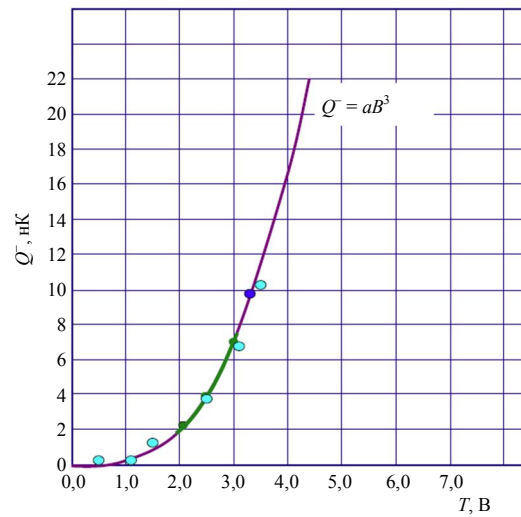


Рис. 4. Зависимость числа накопленных электронов струны от продольного магнитного поля

Электронно-струнный источник "Крион-2" [2, 3] был разработан и использован для формирования интенсивных пучков многозарядных ионов на сверхпроводящем синхротроне ОИЯИ — "Нуклотроне" [4, 5]. Спектры ионов  $Ar^{16+}$  и  $Fe^{24+}$ , полученные на этом источнике, показаны на рис. 5. Ионные пучки для "Нуклотрона" имели следующие параметры: ток ионов  $I_i = 200$  мкА, время удержания ионов  $\tau = 0,5$  с для  $Ar^{16+}$  [4] и  $I_i = 200$  мкА,  $\tau = 1,1$  с для  $Fe^{24+}$  [5] при длительности импульса инжекции 8 мкс.

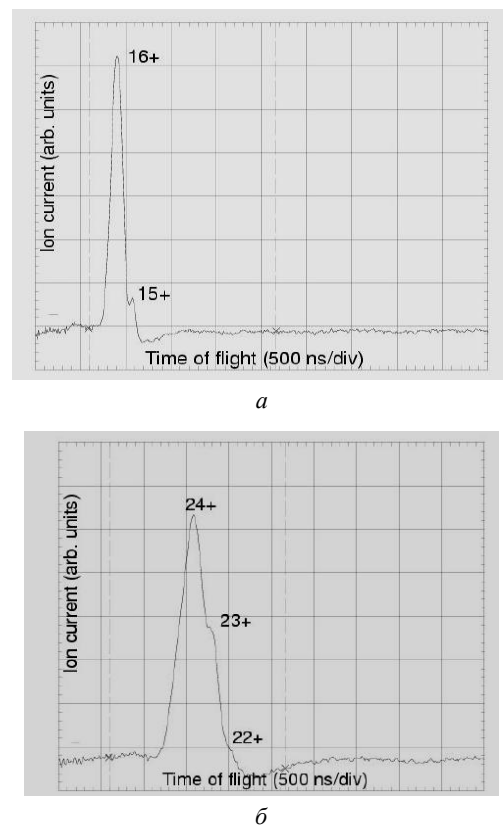


Рис. 5. Спектры ионов в "Крион-2": а —  $Ar^{16+}$ ; б —  $Fe^{24+}$

Отметим, что в соответствии с одночастичным приближением накопленный заряд должен быть пропорционален  $Q \propto B^2$ . Столь быстрый его рост от величины магнитного поля  $Q \propto B^3$ , по-видимому, обусловлен либо более сильной зависимостью угла рассеивания  $\alpha$  от величины магнитного поля, либо эффектами поперечной диффузии электронов струны ( $Q \propto B^4$ ).

Экспериментально измеренный энергетический спектр накопленных электронов приведен на рис. 6. Характерная ширина спектра составляет  $\Delta E/E \cong 0,3$ , при этом около 10 % электронов струны имеют энергию выше той, что они приобрели при ускорении в пушке. Их дальнейшее доускорение, по-видимому, также связано с развитием неустойчивостей в струне.

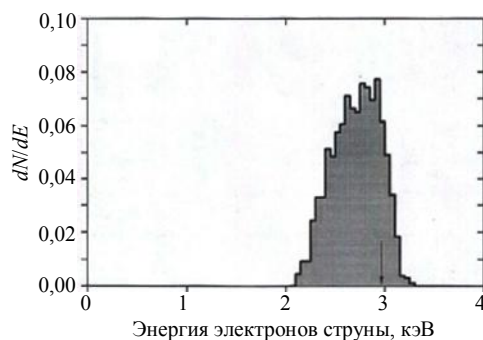


Рис. 6. Функция распределения электронов струны

Формирование многозарядных ионов в ЭСИС обусловлено ультравысоким вакуумом порядка  $10^{-12}$  Торр в дрейфовой камере благодаря тому, что она находится при гелиевой температуре. В результате при столь высоком вакууме эффекты рекомбинации не вносят заметного вклада в формирование ионов.

### Ион-ионное охлаждение

Число накопленных ионов определяется количеством электронов в струне и составляет  $Q^+ \cong (0,6-0,8)Q^-$ . Уход многозарядных ионов в поперечном направлении начинается, когда их температура становится равной порядка величины радиального потенциального барьера для частично нейтрализованного электронного пучка

$$T_i \approx \frac{1-\eta}{\Lambda} \cdot \frac{Ie}{v} \cdot (1+2 \ln(b/a)) \cong 10 \text{ эВ},$$

где  $I \cong kI_{b0} \cong 100$  мА — суммарный ток электронов струны;

$\eta \cong 0,6-0,8$  — степень нейтрализации пространственного заряда электронов струны;

$\Lambda \cong 5$  — логарифмический фактор.

Снижение температуры многозарядных ионов позволяет повысить степень нейтрализации пространственного заряда электронов и тем самым увеличить интенсивность выведенных ионных пучков.

Для снижения температуры многозарядных ионов предложен метод ион-ионного охлаждения [13], заключающийся в следующем. В рабочую камеру с накапливаемыми многозарядными ионами импульсно инжектируются атомы более легкого газа. В результате ионизации электронами струны возникает смесь из многозарядных и легких ионов. За счет столкновений тяжелые многозарядные ионы передают свою энергию легким ионам, вследствие чего последние быстро покидают систему, а многозарядные ионы охлаждаются до более низких температур. Это в конечном счете ведет к росту тока выведенного пучка многозарядных ионов.

Зависимость числа накопленных ионов золота от времени охлаждения (времени импульсной инжекции атомов СО) показана на рис. 7, а [14]. Ион-ионное охлаждение позволяет в два раза повысить интенсивность пучков  $\text{Au}^{51+}$ , в результате удается накопить  $10^8$  таких ионов и сформировать ионные пучки с током около 100 мкА при длительности импульса тока 8 мкс [14]. Спектр многозарядных ионов золота при разных временах инжекции атомов СО показан на рис. 7, б [14]. Оптимальное время импульсной инжекции атомов СО должно быть на 200 мс меньше, чем время ионизации.

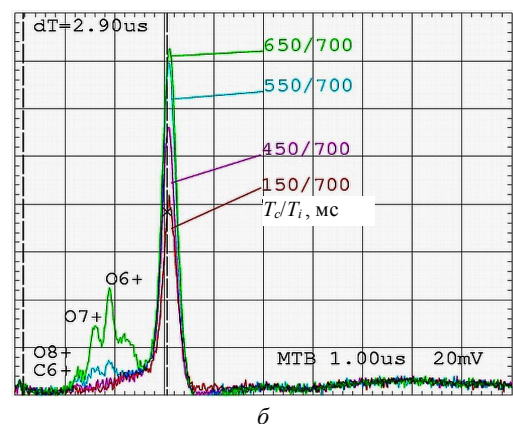
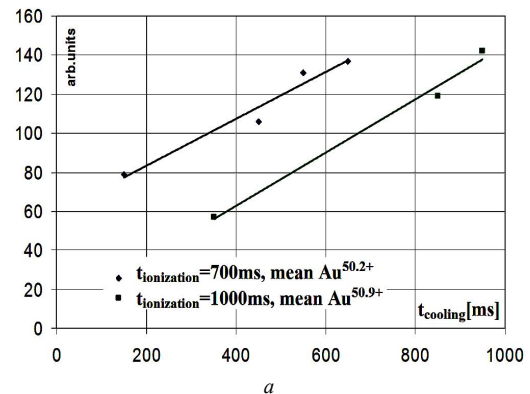


Рис. 7. Ион-ионное охлаждение:

а — зависимость интенсивности выведенных пучков ионов золота от времени охлаждения;  
б — спектры ионов золота (среднее значение заряда  $q = 50,2$ ) при времени ионизации ионов 0,7 с для различных времен импульсной инжекции СО:  $T_c = 150, 450, 550$  и 650 мс

### Формирование радиоактивных пучков ионов углерода

Пучки ионов углерода эффективно применяются для лечения онкологических заболеваний. Одна из наиболее современных диагностик онкологических опухолей — позитрон-эмиссионная томография (ПЭТ). Формирование интенсивных пучков ионов  $^{11}\text{C}^{6+}$  позитронно производящего изотопа  $^{11}\text{C}$  дает возможность одновременно решить обе задачи: терапию онкологических заболеваний и верификацию дозы облучения на основе позитронно-эмиссионной томографии. С этой целью с помощью метода ISOLDE нарабатывается радиоактивный метан  $^{11}\text{CH}_4$ . При его получении в газовую камеру с молекулами азота добавляется 5 % молекул водорода. При облучении камеры пучком с током 20 мА и энергией протонов 18 МэВ в течение 20 мин (время полураспада изотопа  $^{11}\text{C}$ ) нарабатывается около  $10^{14}$  молекул радиоактивного метана  $^{11}\text{CH}_4$ . В криогенной ловушке этот метан отделяется от азота, а затем загружается в специальную криогенную ячейку ионного источника ЭСИС.

В связи с ограниченным числом молекул радиоактивного метана, нарабатываемых за цикл инжекции в ЭСИС, принципиальным является создание условий, при которых реализуется высокая эффективность их конверсии в ионы  $^{11}\text{C}^{4+}$ , используемые для углеродной терапии и ПЭТ-диагностики.

Для обеспечения высокой эффективности конверсии изотопов метана в ионы углерода используют схему импульсной инжекции, реализованную для ион-ионного охлаждения. Для импульсной инжекции метана в ЭСИС "Крион-2" разработана специализированная криогенная ячейка, в которой весь загруженный метан замерзает, а потом порционно инжектируется в рабочий объем при подаче импульса нагрева [15]. При полном количестве загружаемых молекул метана  $10^{14}$  за один импульс инжекции газа в рабочий объем источника попадает только около  $10^{10}$  молекул метана.

В ходе экспериментов были исследованы импульсные свойства криогенной ячейки. Зависимость числа выведенных ионов углерода  $\text{C}^{4+}$  от времени задержки между началом нагрева и началом накопления ионов при длительности импульса нагрева 2 мс и времени ионизации 10 мс показана на рис. 8, а. При такой длительности импульса нагрева около 90 % испарившихся молекул метана попадает в рабочий объем в течение 3,5 мс.

Эксперименты с импульсной инжекцией молекул метана проведены при энергии электронов 3,1 кэВ, токе инжекции с катода 6,4 мА и частоте повторения импульсов тока выведенных ионов 0,71 Гц.

Число выведенных ионов за импульс составило 3 нК ( $4,6 \cdot 10^9$  ионов  $\text{C}^{4+}$  за импульс). Все молекулы метана ( $10^{14}$  молекул), загруженные в источник, израсходованы в течение 4,9 ч и трансформированы в ионы углерода с их суммарным зарядом  $Q^+ = 29$  мкК. При этом в спектре ионов содержалось около 38 % ионов углерода  $\text{C}^{4+}$  (см. рис. 8, а), а их суммарный заряд составил около 1,1 мкК.

Таким образом,  $10^{14}$  молекул метана в ЭСИС были трансформированы в  $1,7 \cdot 10^{13}$  ионов  $\text{C}^{4+}$ , что соответствует эффективности конверсии 17 % для стандартного синхротронного режима с частотой повторения импульсов инжекции в него около 1 Гц.

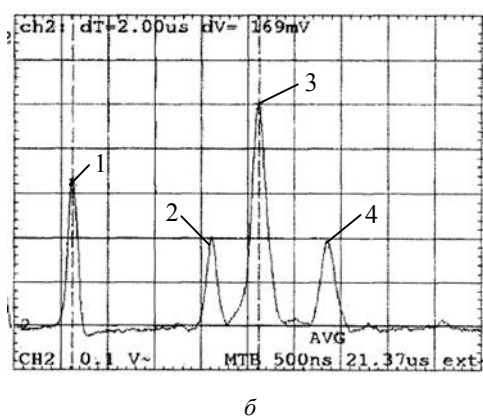
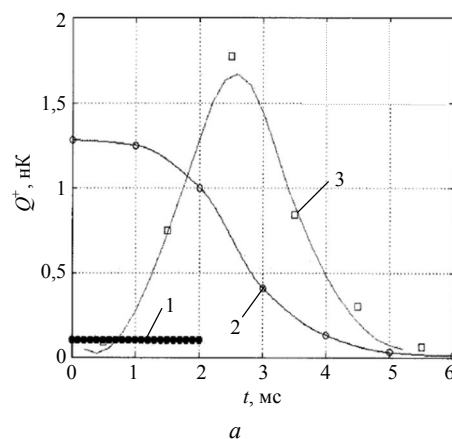


Рис. 8. Пучки ионов углерода:

а — зависимость полного заряда выведенных ионов и его производной от времени задержки между началом нагрева и началом накопления ионов при длительности импульса нагрева 2 мс и времени ионизации 10 мс:  
1 — нагрев; 2 —  $Q$ ; 3 —  $dQ/dt$ ;  
б — спектр ионов: пики 1 —  $\text{H}^+$ ; 2 —  $\text{C}^{5+}$ ; 3 —  $\text{C}^{4+}$ ; 4 —  $\text{C}^{3+}$

Для углеродной терапии онкологических заболеваний требуются пучки ионов углерода на опухоли  $10^9$  частиц/с. Стандартная интенсивность пучка на опухоли пациента для синхротронов, используемых для углеродной терапии, таких как НИМАС, составляет 10 % от интенсивности пучка при его инжекции.

Итак, для эффективной углеродной терапии и ПЭТ диагностики в ионном источнике должны

быть сформированы пучки радиоактивных ионов  $^{11}\text{C}^{4+}$  с интенсивностью около  $10^{10}$  частиц/с.

В настоящее время в ЭСИС сформированы ионные пучки с интенсивностью  $4 \cdot 10^9$  частиц/имп. при частоте повторения около 1 Гц. Дальнейшее увеличение интенсивности углеродного пучка ограничено емкостью электронной струны, для увеличения которой в настоящее время ведутся работы над созданием нового ЭСИС с продольным магнитным полем  $B = 5$  Тл.

### Электронно-струнный источник трубчатой геометрии

Предельная интенсивность линейной электронной струны в ЭСИС ограничена возникновением виртуального катода в пространстве дрейфа. В целях увеличения интенсивности пучков многозарядных ионов в 2003 г. в ОИЯИ был предложен трубчатый электронно-струнный ионный источник (ТЭСИС) [6]. Использование трубчатой электронной струны в системе с внутренней и внешней заземленными стенками значительно повышает интенсивность струны и, соответственно, интенсивность выведенного ионного пучка.

ТЭСИС может формировать электронную струну с интенсивностью, в 25—50 раз выше, чем ЭСИС. Таким образом, ТЭСИС дает возможность поднять интенсивность ионного пучка по сравнению с ЭСИС на один—два порядка.

Одна из основных проблем, возникающих в ТЭСИС, связана с выводом ионов из трубчатой электронной струны. Стандартное решение, реализованное в ИЭЛ и ЭСИС, является неприемлемым из-за высокого эмиттанса выведенного ионного пучка, формируемого в трубчатой электронной струне относительно большого поперечного размера. Чтобы обойти эту проблему, в ОИЯИ был предложен неаксиальный вывод ионов [6], позволяющий достичь малого эмиттанса.

Схема ТЭСИС "Крион-Т1" [9, 10] приведена на рис. 9, а. В этом источнике предполагается использовать магнитное поле с напряженностью 5 Тл, чтобы уменьшить скорость ухода электронов и увеличить их число в струне.

Выбор трубчатой геометрии струны и повышенные магнитного поля с 3 до 5 Тл позволяет получить в ТЭСИС импульсный ток 10 мА для ионов  $\text{Ar}^{16+}$  и  $\text{Fe}^{24+}$  и средний ток 10 мкА.

ТЭСИС состоит из четырех основных систем: криомагнитной, электронно-оптической, ионно-оптической и вакуумной.

Особенности конструкции "Крион-Т1" связаны с его трубчатой геометрией, высоким магнитным полем 5 Тл и применением криокулера, имеющего две секции, одна из которых находится при температуре 4,2 К, другая — при 40 К.

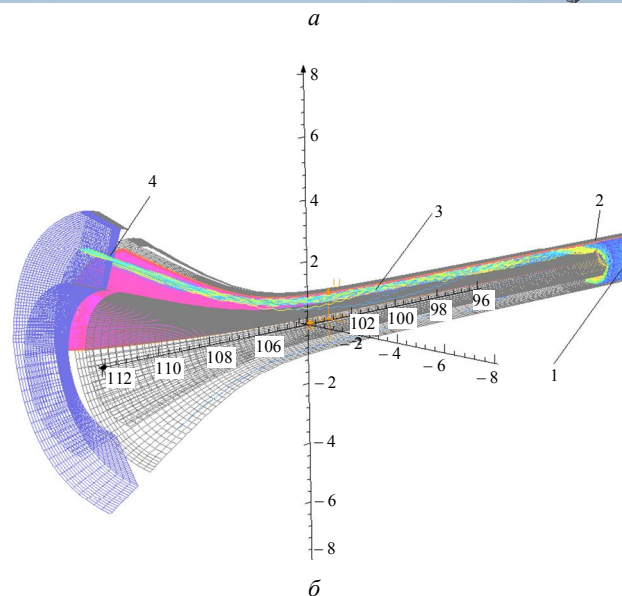
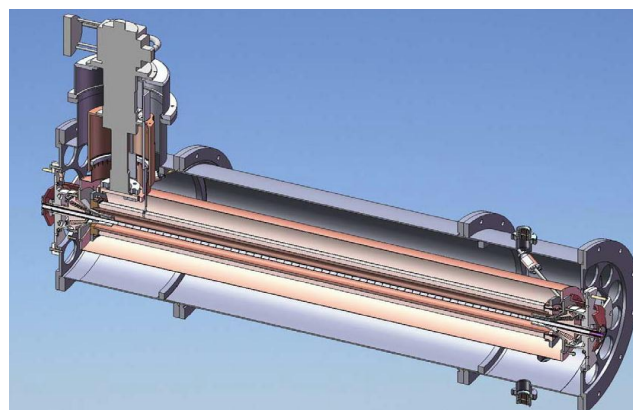


Рис. 9. Трубчатый электронно-струнный ионный источник: а — общий вид; б — расчет неаксиального вывода ионов из ТЭСИС: 1 — трубчатая электронная струна; 2 — трубчатый ионный пучок; 3 — неаксиальный вывод ионного пучка; 4 — выведенный ионный пучок

На основе компьютерных расчетов [9, 10] были сконструированы электронно-оптическая и ионно-оптическая системы. Электронная пушка имеет три электрода, диаметр трубчатого эмиттера равен 73,8 мм, а его ширина — 1 мм. В пушке установлен прикатодный электрод для управления током эмиссии. Электроды отражателя электронов имеют аналогичную структуру, что и электроды пушки, при этом напряжение на отражательном электроде на 2 кВ выше, чем на катоде. Отверстие в отражательном электроде для вывода ионов смещено по радиусу относительно оси системы и находится на некотором азимуте (см. рис. 9, б, поз. 1—4).

Дрейфовая структура ТЭСИС состоит из нескольких электродов, предназначенных для формирования потенциальных барьеров ловушки ионов и их неаксиального вывода. Канал вывода (см. рис. 9, б) начинается в области сильного магнитного поля и располагается вдоль одной из его силовых линий, проходящей через выводное отверстие в отражателе. Расчеты канала вывода ионов

выполнены с использованием пакета "Опера-3Д". Азимутальная ширина канала составляет  $10^\circ$ . Ионы удерживаются в азимутальном направлении канала с помощью электродов. Кроме того, электроны ускоряются до энергии 2 кэВ по мере их транспортировки в выводном канале. В отверстии отражательного электрода выведенный пучок ионов имеет эллиптическую форму, его радиальный и азимутальный размеры равны, соответственно,  $\Delta r_i = 2$  мм и  $\Delta \varphi_i = 8$  мм [10]. В результате нормализованный радиальный и азимутальный эмиттансы пучка при напряжении на отражательном электроде 6 кВ, соответственно, равны  $\varepsilon_{r-n} = \beta_i \cdot \Delta r_i^2 / 4\rho_i = 0,05$  п·мм·мрад и  $\varepsilon_{\varphi-n} \cong \beta_i \cdot \Delta r_i \cdot \Delta \varphi_i / 4\rho_i = 0,15$  п·мм·мрад, ( $\rho_i = v_i / \omega_i = 10$  см — ионный ларморовский радиус, рассчитанный по полной энергии). Расчетные эмиттансы трубчатого пучка, выведенного из источника при энергии 25 кэВ/н равны, соответственно,  $\varepsilon_r \cong 5$  п·мм·мрад и  $\varepsilon_\varphi \cong 20$  п·мм·мрад.

ТЭСИС "Крион-Т1" для ОИЯИ изготавливается во ВНИИЭФ в рамках МНТЦ-сотрудничества [9, 10, 12]. В 2010 г. планируется начать эксперименты по формированию на нем трубчатой электронной струны.

### Заключение

Предложенная в данной работе трубчатая геометрия электронно-струнного ионного источника

позволит в ближайшей перспективе получать пучки многозарядных ионов с импульсным током до 10 мА.

Работа выполнена при поддержке МНТЦ  
в рамках гранта № 3454.

### Литература

1. Donets E. D. Physics and Technology of Ion Sources// Ed. by I. G. Brown, Wiley & Sons, NY, 1989. — 245 p.
2. Донец Д. Е., Донец Е. Д., Донец Е. Е. Ионный источник; Пат. 2067784 РФ; Бюл. "Изобретения", 1996. — 27 с.
3. Donets E. D. // J. of Phys.: Conf. Series. 2004. No. 2. P. 213.
4. Donets E. D. et al. Electron String Source of Highly Charged Ions: Studies and First Test on a Synchrotron// EPAC 02.
5. Donets D. E. et al.// Rev. Sci. Instrum. 2004. No. 75. P. 1543.
6. Донец Д. Е., Донец Е. Д., Донец Е. Е. Ионный источник// Пат. RU 2 205 467 РФ; Бюл. "Изобретения", 2003. № 15.
7. Donets E. D. et al.// Rev. Sci. Instrum. 2002. No. 73. P. 696.
8. Donets E. E. // J. of Phys.: Conf. Series 2. 2004. No. 97.
9. Donets E. E. et al.// EPAC08. 2008. No. 403.
10. Donets E. D. et al.// HIAT09. 2009. No. E2.
11. Donets E. D. et al.// Review of Scientific Instruments. 2000. V. 71. No. 2. P. 887.
12. Донец Е. Д. и др.// Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 1. С. 1.
13. Донец Е. Д., Ширков Г. Д. Метод получения высокозарядных ионов: Сертификат СССР.1984. № 1225420.
14. Donets D. E. et al.// Review of science instruments. 2009. V. 80. P. 063304.
15. Donets E. D. et al.// HIAT09. 2009. No. E1.

## Electron-string ion sources of highly charged ions with linear and tubular geometry of string

D. E. Donets, E. D. Donets, E. E. Donets, V. M. Drobin, V. V. Salnikov, E. M. Syresin,  
A. V. Shabunov, V. B. Shutov

Joint Institute for Nuclear Research, 6 J. Curie str., Dubna, Moscow Region, 141980, Russia  
E-mail: syresin@nusun.jinr.ru

*Electron string ion sources proposed in JINR are used in several accelerator centers for production of highly charged ions including bare nuclei. In this source the electrons confined in a high magnetic field perform about 100—1000 oscillations between electron gun and reflector. It led to creation of the dense electron plasma (electron string) at a low current of the electrons emitted from the cathode. As result, the dissipated electron power is decreased by 2—3 orders of magnitudes at same electron density in the reflex ion source. Electron string ion sources was used for production of  $Ar^{16+}$ ,  $Fe^{24+}$  and  $Au^{51+}$  ion beams at current of 100—200  $\mu A$  in a pulse of about 8  $\mu s$ . To increase capacity of the ion trap a tubular geometry of the electron string was proposed in JINR which should provide ion output on a level, approaching to 10 mA of  $Ar^{16+}$  ions in the pulse mode.*

PACS: 41.75.-i; 52.50.-b

Keywords: highly charged ion, ion source, electron beam, cathode, electron string, plasma.

Bibliography — 15 references.

Received 18 November 2009