

91-449



**сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна**

P9-91-479

А.И.Говоров, В.А.Мончинский, В.А.Попов,
К.А.Решетникова, И.Н.Семенюшкин,
В.В.Слесарев, М.С.Хвастунов

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ФОРИНЖЕКТОР

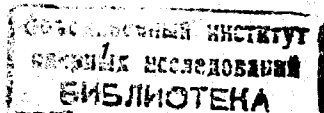
1991

На первом этапе эксплуатации нуклотрона - тяжелоионного синхротрона, сооружаемого в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ, планируется использовать имеющийся в лаборатории инжектор синхрофазотрона. Первым в канале инжекции стоит предускоритель прямого действия на основе импульсного трансформатора ИТ-800. Этот трансформатор находится в эксплуатации уже около 40 лет и давно выбрал свой ресурс; при выходе из строя трансформатор практически невозможно восстановить. Кроме того, высокий потенциал на ионном источнике (~ 600 кВ) усложняет управление этим источником; для замены ионного источника требуется значительное время, что снижает эффективность использования времени работы ускорительного комплекса. Поэтому в лаборатории давно назрела потребность в замене импульсного трансформатора более эффективным устройством.

Во многих ускорительных центрах использовавшиеся ранее форинжекторы — ускорители прямого действия Кокрофта-Уолтона или ускорители на основе импульсного трансформатора — заменяются на линейные резонансные ускорители с пространственно-однородной высокочастотной квадрупольной фокусировкой. Этот форинжектор может работать при пониженном напряжении на ионном источнике (~ 100 кВ) и обладает уникальной возможностью ускорения больших ионных токов (сотни мА) при $\sim 100\%$ -ном захвате первичного пучка в режим ускорения и малом эмиттансе ускоренного пучка. Для поддержания приемлемого темпа ускорения ($\sim 0,5$ МэВ/м) в ускорителе с квадрупольной ВЧ-фокусировкой поля на поверхности электродов выбирают максимально допустимыми по пробою, что ограничивает возможности этого форинжектора для ускорения ионов в большом интервале значений q/A (q — заряд, A — массовое число ионов).

Предложенный ранее^{1/} предускоритель для нового инжекционного комплекса нуклотрона обладает избыточными (применительно к нашей цели) возможностями*: в первом варианте предускорителя^{1/} эффективное ускоряющее напряжение составляет 5,6 МВ, а для наших целей достаточно 1 МВ; зарядность ускоряемых ионов $q/A \geq 0,16$, а в нашем случае $q/A \geq 0,33$ (поскольку в следующем за форинжектором ускорителем Альвареса ЛУ-20 возможно ускорение ионов лишь с $q/A \geq 0,33$).

* И, следовательно, неоправданно завышенными сложностью конструкции, настройки и эксплуатации.



Были выполнены численные оценки параметров ускоряющих структур, включающих спиральные проводники, двухпроводные линии и др. Применительно к нашей задаче — разработке ВЧ-форинжектора оптимальным оказался линейный резонансный ускоритель с двумя ускоряющими зазорами на основе четвертьволнового коаксиального резонатора, подобный созданному в Новосибирском институте ядерной физики СО АН СССР^{1,2,3,4}. Основные параметры этого ускорителя приведены в табл. 1. Особенностью этого ускорителя является возможность (реализованная путем подбора длины дрейфовой трубки) ускорения как протонов, так и легких ядер ($q/A = 0,5$) практически без перестройки резонатора; угол пролета в трубке дрейфа составляет $3/2 T$ для протонов и $5/2 T$ для ядер (T — период ускоряющего ВЧ-напряжения).

Новосибирский ускоритель^{1,2,3,4} имеет два важных конструктивных достоинства: 1) генераторная лампа расположена непосредственно на резонаторе, что существенно упрощает конструкцию ускорителя и его эксплуатацию; 2) внешний проводник коаксиального резонатора разделен на две части (верхнюю и нижнюю), соединенные друг с другом через конденсатор с большой емкостью. На верхней части расположена упомянутая выше генераторная лампа, а на нижнюю часть подано постоянное смещение (4 кВ) с целью подавления резонансного высокочастотного разряда.

В предлагаемом ВЧ-форинжекторе для ускорения ионов с различными зарядностями q/A (от 0,33 до 1) планируется применить известный и более универсальный, чем в^{1,2-4}, способ: при изменении q/A ускоряемых ионов изменять все напряжения U в системе так, чтобы произведение $(q/A) \cdot U$ оставалось бы постоянными. Длина дрейфовой трубки может быть выбрана существенно меньшей, чем в^{1,2,3,4} (~ 3 см вместо 47 см), что снижает величину укорачивающей емкости четвертьволнового резонатора. В ВЧ-форинжекторе планируется (подобно^{1,2-4}) разместить генераторную лампу на резонаторе и разделить внешний проводник коаксиального резонатора на две части (что-

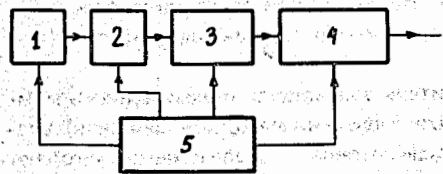


Рис. 1. Схема высокочастотного форинжектора. 1 — ионный источник; 2 — высоковольтная платформа; 3 — группирователь ионов; 4 — ускоряющий резонатор; 5 — система управления форинжектором.

бы обеспечить возможность подавления ВЧ-резонансного разряда посредством подачи постоянного смещения).

На рис. 1 представлена схема предлагаемого ВЧ-форинжектора. Ионный источник 1 (поляризованных дейтронов, лазерный, электронно-лучевой, дуоплазмотрон, источник типа Пеннинга) размещен на высоковольтной платформе 2 со стабилизированным ($\sim 0,1\%$) и регулируемым (от ~ 30 кВ до ~ 70 кВ) напряжением U_0 .

Клистронный группирователь ионов примерно 50% первичного пучка преобразует в сгустки с фазовой протяженностью $\sim 15^\circ \div 20^\circ$, при этом вносимый группирователем импульсный разброс пучка не превышает 3%. Для проводки ионного пучка от источника до первого ускоряющего зазора применена периодическая электростатическая фокусировка. При низкой энергии пучка ($U_0 \leq 70$ кВ) эффективность такой фокусировки достаточно высока и позволяет фокусировать пучки с током ~ 50 мА. Питание резонатора группирователя осуществляется через петлю связи от ускоряющего резонатора. Как уже отмечалось выше, ускоряющий резонатор 4 выбран подобным описанному в^{1,2,3,4}. Система управления форинжектором 5 включает мини-ЭВМ, датчики напряжения U_0 , амплитуд группировочного и ускоряющего напряжения и их фазы.

На рис. 2 приведена схема ускоряющего резонатора форинжектора: 1 и 2 — верхняя и нижняя части резонатора (внешний проводник коаксиальной линии), 3 — внутренний проводник коаксиальной линии с дрейфовой трубкой 7, 4 — разрыв во внешнем проводнике коаксиальной линии, 5 и 6 — полутрубки дрейфа, 8 и 9 — настроечные конденсаторы. На рисунке не показаны вакуумный кожух резонатора, генераторная лампа на верхней части резонатора и другие детали. Настраиваемые конденсаторы предназначены для тонкой подстройки частоты, а также для перехода от частоты $f_1 = 29$ МГц на частоту $f_2 = 48,33$ МГц. На первой частоте $f_1 = f_0/5$ ($f_0 = 145$ МГц — рабочая частота ускорителя Альвареса ЛУ-20) осуществляется ускорение ионов с $0,33 \leq q/A \leq 0,5$, а на второй $f_2 = f_0/3$ — ускорение протонов.

Особенностью новосибирского ускорителя^{1,2,3,4} и предлагаемого форинжектора является существенное превышение амплитуды ускоряющего напряжения U_a в резонаторе над напряжением U_0 инъекции (в нашем случае $U_0 \leq 70$ кВ и $U_a \leq 680$ кВ). В этих условиях входное отверстие ускоряющего зазора работает как фокусирующая линза с переменным фокусным расстоянием, зависящим от фазы входа иона в зазор; это приводит к существенному росту фазового объема пучка. Для снижения этого нежелательного фактора входное и выходное отверстия первого ускоряющего зазора закрыты сетками с высокой прозрачностью, — применен известный способ, использованный в^{1,2,3,4}.

Расчеты динамики пучка в форинжекторе выполнялись путем решения уравнений движения ионов. Расчеты производились для ряда вариантов, отличающихся фазами входа и углами пролета обоих ускоряющих зазоров и углом пролета ионов в дрейфовой трубке. Конечной целью расчетов было выявление условий, при которых ускоренный пучок имел бы минимальный энергетический разброс $\Delta T/T$ при достаточно большой фазовой протяженности $\Delta \varphi_{in}$ ионного сгустка. При этом, в отличие от условий в^{1,2,3,4}, накладывалось дополнительное требование: приемлемые величины $\Delta T/T$ и $\Delta \varphi_{in}$ должны обеспечиваться в некотором интервале выходной энергии ионов. Вариация энергии ионов на выходе форинжектора достигается путем изменения напряжения

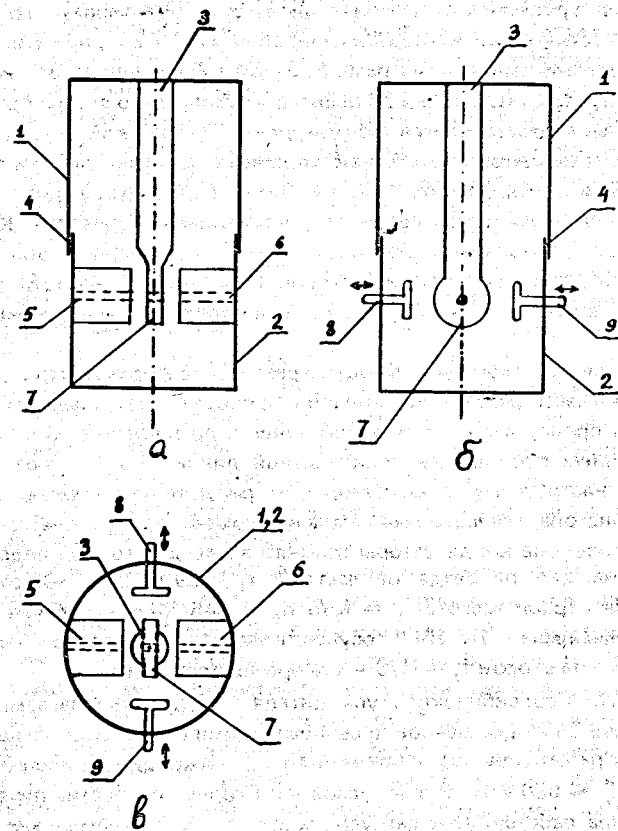


Рис. 2. Схема ускоряющего резонатора форинжектора: а) вид сбоку; б) вид по пучку; в) вид сверху.

U_0 инъекции, амплитуды U_a ускоряющего напряжения в резонаторе и фазового сдвига между группирующим и ускоряющим резонаторами.

В табл. 1 приведены основные параметры высокочастотного форинжектора и, для сравнения, ускорителя^{1,2,3,4,1}. Как уже отмечалось выше, ионы и протоны ускоряются в форинжекторе на разных частотах. Ускорение протонов возможно также на "ионной" частоте 29 МГц, но тогда их выходная энергия будет равна 380 кэВ; для инъекции протонов в ЛУ-20 желательна повышенная энергия. Фазовая протяженность ускоренных ионных сгустков составляет: $\Delta\varphi \leq 20^\circ$ (на частоте $f_1 = 29$ МГц), что дает возможность захвата ионных сгустков (практически без потерь) в режим ускорения в ЛУ-20 (на частоте $f_0 = 145$ МГц) при равновесной фазе $\varphi_s = -30^\circ$.

Таблица 1. Основные параметры высокочастотного форинжектора

Параметр	Данное предложение		1,2,3,4,1	
	ионы ($0,33 \leq q/A \leq 0,50$)	протоны	ионы ($q/A = 0,50$)	протоны
Рабочая частота, МГц	29	48,33	30	
Напряжение инъекции, кВ	68	63	50	
Энергия инъекции, кэВ/А	23	63	25	50
Выходная энергия, кэВ/А	380	1060	700	1500
Энергетический разброс	$\pm 1\%$		$\pm 1\%$	
Число ускоряющих зазоров	2		2	
Длина ускоряющего зазора, см	5		7	
Амплитуда ускоряющего напряжения, кВ	680	630	1300 (1650)	
Амплитуда ускоряющего поля, кВ/см	136	126	186 (236)	
Акцептанс ускорителя мм·мрад	20π		20π	
Импульсная мощность ВЧ-потерь, кВт	500	200	1500	

Новосибирский ускоритель работает при высоких полях в ускоряющих зазорах: 186 кВ/см и даже до 236 кВ/см. В предлагаемом форинжекторе при таких ускоряющих полях возможно ускорение ионов с пониженной зарядностью: $q/A \geq 0,2$.

В табл. 2 приведены основные расчетные параметры ускоряющего резонатора предлагаемого форинжектора. Для перестройки резонатора с частоты $f_2 = 48,33$ МГц, на которой ускоряются протоны, на частоту $f_1 = 29$ МГц ускорения ионов необходимо увеличить укорачивающую емкость с 20 до 76 пФ; при этом шунтовое сопротивление резонатора снижается вдвое.

При оптимальной организации системы инъекции каждый ионный источник снабжается своим форинжектором и каналом транспортировки ионов, связанным с основным инжектором. В этих условиях исследования с источником, подготовка его к работе на ускорителе выполняются автономно, что существенно повышает эффективность использования времени работы ускорительного комплекса. Предлагаемый форинжектор включает надежные и сравнительно простые элементы и может производиться в достаточном количестве экземпляров.

Таблица 2. Основные параметры ускоряющего резонатора высокочастотного форинжектора

Параметр	Данное предложение		/2,3,4/	
	ионы ($0,33 \leq q/A \leq 0,5$)	протоны	ионы ($q/A = 0,50$)	протоны
Рабочая частота, МГц	29	48,33	30	
Диаметр внешнего проводника коаксиальной линии, мм		900	840	
Диаметр внутреннего проводника коаксиальной линии, мм		150	156	
Волновое сопротивление коаксиальной линии, Ом		108	101	
Длина коаксиальной линии, мм		980	1250	
Укорачивающая емкость зазоров, пФ	76	20	50	
Шунтовое сопротивление резонатора, кОм	460	950	580	

Линейный резонансный ускоритель ионов на основе двухзазорного резонатора /2,3,4/ прост в конструкции, наладке и эксплуатации. Предлагаемая модификация подобного ускорителя обладает как этими достоинствами, так и новым качеством — возможностью вариации выходной энергии пучка. Изменить выходную энергию ионов форинжектора (по крайней мере в широких пределах) не требуется. Однако это качество ускорителя — вариация выходной энергии — весьма ценно при использовании его в прикладных исследованиях и в промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Говоров А.И. и др. — Сообщение ОИЯИ, 9-89-605, Дубна, 1989.
2. Абдульманов В.Г. и др. — Препринт ИЯФ 78-25, Новосибирск, 1978.
3. Абдульманов В.Г. и др. — В сб.: X Межд. конф. по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. ИФВЭ, Серпухов, 1977, т.1, с.345.
4. Баранов И.А. и др. — В сб.: Всесоюзное совещание по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. Л.: НИИЭФА, 1979, т.1, с.114.

Рукопись поступила в издательский отдел

5 ноября 1991 года.