

О ПРОЕКТЕ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ С ПОНИЖЕННОЙ ЭНЕРГИЕЙ ИНЖЕКЦИИ И С ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ПУЧКА

И. М. КАПЧИНСКИЙ, А. М. МАЛЬЦЕВ, В. А. ТЕПЛЯКОВ

*Институт физики высоких энергий, Серпухов, ССР.
Докладчик И. М. Капчинский*

В настоящее время в ИФВЭ рассматривается проект линейного ускорителя на средний импульсный ток пучка до 200–250 ма. Ускорение и фокусировка осуществляются высокочастотным электрическим полем, не обладающим аксиальной симметрией. Проведенные расчеты показывают, что такой линейный ускоритель не требует высоковольтного форинжектора. В то же время предельное значение тока пучка (при заданной частоте поля) оказывается в несколько раз выше, чем в цилиндрических резонаторах, возбуждаемых на волне E_{010} . Для создания ускоряющего и фокусирующего поля могут быть использованы малогабаритные резонаторы с продольной магнитной волной [1].

Блок-схема линейного ускорителя, рассчитанного на ускорение протонного пучка со средним импульсным током 250 ма, приведена на рис. 1. Ускоритель состоит из следующих элементов: 1) ионная пушка с напряжением 100 кВ и током 400 ма; 2) согласующее устройство с высокочастотным демонохроматором; 3) две секции с пространственно-однородной жесткой фокусировкой, представляющие собой четырех-электродные линии, запитываемые от резонансных объемов [2]; 4) три секции с «рогатыми» электродами, создающими в ускоряющих зазорах квадрупольные компоненты электрического поля [3, 4]. Длины секций, а также энергия протонов на входе и выходе каждой секции указаны на рисунке.

В первой секции осуществляется ускорение квазистационарных сгустков до энергии 700 кэВ. На входе секции синхронная фаза близка к 90° . Сгустки следуют вплотную друг за другом и средний ток захваченного пучка на входе близок к пиковому. Основные параметры секции—эффективность ускорения θ (фактор пролетного времени) и син-

хронная фаза φ_c — адиабатически изменяются вдоль оси ускорителя так, что сохраняются величины $b \sin \varphi_c / v_s^2$ и $v_s \Phi(\varphi_c)$, (v_s — скорость «синхронной» частицы. Φ — фазовая протяженность сепаратриссы). При этом обеспечивается постоянство длины сгустков, частоты малых фазовых колебаний и абсолютного разброса продольных импульсов. Сохранение среднего расстояния от электродов до оси обеспечивает постоянство частоты поперечных колебаний. Таким образом, по мере роста скорости частиц сгустки раздвигаются, сохраняя неизменные геометрические размеры и распределение плотности заряда. Отношение выходной энергии секции к входной выбрано так, чтобы синхронная фаза к концу секции снизилась до 37° . Средний ток пучка сохраняется, а пиковый ток сгустка возрастает к концу секции приблизительно в три раза. Продольная компонента собственного поля пучка монотонно растет вдоль первой секции. Предельное значение тока, связанное с продольным расталкиванием, в начале секции заведомо выше, чем в дальнейшей части, и определяется параметрами ускорителя на переходе из первой секции во вторую. Существенно, что при заданных значениях энергии частиц, числа периодов фокусировки, приходящиеся на одно поперечное колебание, и пропускной способности канала, кулоновский предел пикового тока, связан с поперечным расталкиванием, в два раза выше, чем в системе Альвареца-Блюэтта, так как период фокусировки вдвое короче. Поскольку пиковый ток сгустка при начальной энергии близок к среднему, то максимальное значение среднего тока, несмотря на низкую энергию инжекции, оказывается в несколько раз выше, чем в системе Альвареца-Блюэтта. Основные параметры всех секций и соответствующие значения токов приведены в таблице на рис. 2.

Процесс группировки пучка, осуществляемый в первой секции, позволяет полностью избежать трудностей, обычно связанных с повышением фазовой плотности пучка на участке дрейфа после банчера.

Для предотвращения пульсаций сгустков установлен демонохроматор, представляющий собой однозакорный резонатор клистронного типа с повышенной частотой поля. Демонохроматор модулирует начальную энергию частиц на $\pm 30\%$.

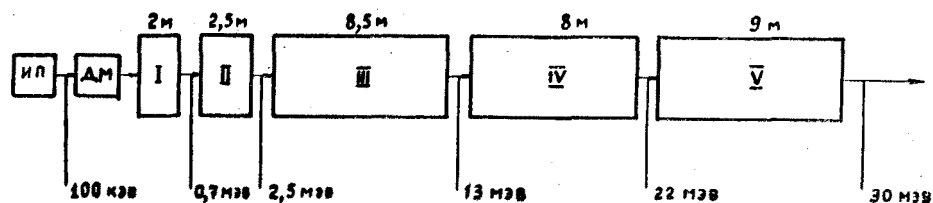
После перехода во вторую секцию адиабатическое изменение синхронной фазы и эффективности ускорения прекращается; прирост энергии на периоде ускорения в дальнейшем остается постоянным в каждой секции.

Выше определенной энергии оказывается более выгодным формировать продольную компоненту электрического поля в зазорах между электродами специальной формы, так как при этом обеспечивается существенно лучшее использование высокочастотного напряжения для целей ускорения частиц. Поэтому последующие три секции представляют собой Н-резонаторы [1] с пространственно-периодической фокусирующей структурой. Предельное значение тока пучка в последних трех секциях приблизительно соответствует системе Альвареца-Блюэт-

та. Выбранная энергия перехода 2,5 Мэв обеспечивает ускорение пучка со средним током 250 ма. Разделение зазоров участка секции с «рогатыми электродами» на две несимметричные половины (в одних половинах «рога» отсутствуют, в других они создают знакопеременную последовательность квадруполей) позволяет получить необходимое соотношение между амплитудами и фазами ускоряющей и фокусирующей компонент электрического поля и снизить напряженность поля у поверхности электродов [4]. Секции характеризуются высокой пропускной способностью и вполне удовлетворительной величиной среднего прироста энергии на единице длины (рис. 2). Использование высокочастотного поля для фокусировки и ускорения по всей длине ускорителя позволяет уменьшить габариты инжектора и объем технологического оборудования, существенно снизить стоимость сооружения, упростить технологию изготовления секций, сократить средние потери высокочастотной мощности в меди.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В. А. Тепляков, Б. Б. Степанов, Радиотехника и электроника, № 11, 1965, 1968.
2. И. М. Капчинский, В. А. Тепляков, Линейный ускоритель ионов с пространственно-однородной жесткой фокусировкой, препринт ИТЭФ № 673, 1969. ПТЭ (в печати).
3. В. В. Владимирский, ПТЭ, № 3, 36, 1956.
4. А. П. Мальцев, С. М. Ермаков, В. А. Тепляков, Атомная энергия, том 23, вып. 3. 1967. Препринт ИФВЭ 63-35-К, 1968.



I - секция ПОФ с переменной синхронной фазой

II - секция ПОФ

III, IV, V - секции с «рогатыми» электродами } постоянная синхр. фаза

$$J = 250 \text{ ма}; \lambda = 2 \text{ м}; E_{\text{пов. макс.}} = 240 \text{ кВ/см}$$

Рис. 1.

Параметры

линейного ускорителя протонов
с высокочастотной фокусировкой и ускорением

№ п/п	Параметр	Обозначение	Единица измерения	I секция	II секция	III секция	IV секция	V секция
1	Энергия на входе	$W_в$	МэВ	0,1	0,7	2,5	13	22
2	Энергия на выходе	$W_к$	МэВ	0,7	2,5	13	22	30
3	Тип фокусировки	—	—	Пространств. однород.	Пространств. однород.	Пространств. периодич.	Пространств. периодич.	Пространств. периодич.
4	Эффективность ускорения	θ	—	0,025-0,30	0,30	0,69	0,74	0,70
5	Синхронная фаза	φ_c	град	86°-37°	37°	30°	30°	30°
6	Длина резонатора	l	м	2,0	2,4	8,6	8,2	9,0
7	Диаметр резонатора	D	см	70	70	41	41	41
8	Среднее ускорение на единице длины	$\frac{dW}{dz}$	МэВ/м	0,3	0,75	1,2	1,1	0,9
9	Диаметр апертуры	$2a$	см	2-1,6	1,6	1,9-2,2	2,4	2,6
10	Длина периода фокусировки	S	—	$\beta\lambda$	$\beta\lambda$	$2\beta\lambda$	$2\beta\lambda$	$2\beta\lambda$
11	Набег фазы поперечн. колебаний на периоде	M	—	0,73	0,73-0,8	1,5	1,5	1,5
12	Минимальная частота поперечных колебаний	ν_{min}	—	0,52	0,52-0,54	0,72	0,74	0,74
13	Пропускная способность	V_k	см/х град	2,78-1,62	1,62-1,77	1,62-2,19	2,6	3,1
14	Добротность резонаторов	Q	—	5000	5000	8000	8000	8000
15	Импульсная мощность потерь	P	кВт	300	300	430	650	1000
16	Предельный пиковый ток	I_{lim}	а	1,2-3,2	3,2	6	25	38
17	Пиковый ток пучка	$I_{пик}$	а	0,4-1,2	1,2	1,5	1,5	1,5
18	Средний ток пучка	$I_{ср}$	ма	250	250	250	250	250
19	Прирост энергии на длине $\beta\lambda$	ΔW	кэВ	0,66-80	80	300	380	390

Рис. 2.