

01;10

©1993 г.

## КУСОЧНО-НЕОДНОРОДНАЯ ИНЖЕКТОРНАЯ СИСТЕМА С РЕГУЛИРУЕМЫМ СКАЧКОМ ФАЗЫ

*А.Н. Опанасенко*

Рассмотрена инжекторная система, состоящая из предгруппирующего резонатора, пролетного участка и кусочно-неоднородного волновода с регулируемым скачком фазы ускоряющей волны. Показано, что данная система обеспечивает коэффициент захвата  $KЗ \cong 0.8$  и формирует сгустки с среднеквадратичными разбросами по энергии  $\sigma_w = 1-2\%$ , по фазам 86% частиц в окрестности максимума энергетического спектра  $\sigma_{F0} \cong 7^\circ$ , не зависящими от импульсного тока в диапазоне  $I_0 \cong 0.1-7$  А. Это дает возможность применения ее в качестве устройства, формирующего пучки в линейных ускорителях электронов многоцелевого назначения.

### Введение. Постановка задачи

Создание линейных резонансных ускорителей электронов многоцелевого назначения, способных решать широкий круг научно-исследовательских задач от ядерной спектрометрии до задач радиационной физики и материаловедения, требует реализации возможности мобильной перестройки режимов работы установки в токовом диапазоне от нескольких сотых до нескольких единиц ампер в импульсе ускоряемого пучка. Это обеспечивается созданием системы инжекции, формирующей электронные сгустки с фазовым объемом, не зависящим от тока пучка в заданном диапазоне. Существующие инжекторные системы, основанные на традиционных механизмах группирования (клистронный и волноводный [1-5]), как правило, рассчитан на один определенный токовый режим работы ускорителя. Использование фотокатодов [6,7] с модулирующим на частоте ускоряющего поля лазерным сигналом значительно повышает сложность и стоимость установки. В настоящей работе с целью решения поставленной задачи мы рассмотрим инжекторную систему, состоящую из предгруппирующего резонатора, пролетного участка и кусочно-неоднородного волновода с регулируемым скачком фазы ускоряющей волны (рис. 1). Данная схема представляет собой синтез ранее известных традиционных схем формирования пучков. Так, использование метода переброса фазы волны в однородной инжекторной секции обсуждалось в работе [1], применение инжекторной секции со ступенчатым повышением фазовой скорости предлагалось авторами [2]. Принципиальная возможность формирования сгустков с фазовым объемом, практически не зависящим от тока инжекции в диапазоне  $I \cong 0.1-8$  А, при помощи

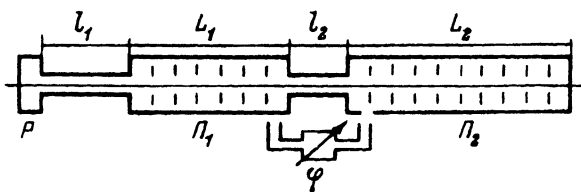


Рис. 1.

$P$  — предгруппирующий резонатор;  
 $l_1$  — длина первого пролетного участка;  
 $L_1$  — длина первой подсекции  $\Pi_1$ ;  
 $l_2$  — длина второго пролетного участка;  
 $L_2$  — длина второй подсекции  $\Pi_2$ ;  
 $\varphi$  — регулируемый фазовращатель, обеспечивающий скачок фазы  $\varphi_{12}$ .

однородного волноводного группирователя регулируемым скачком фазы показана в [8].

Цель настоящей работы состоит в нахождении оптимальных геометрических и электродинамических параметров предложенной инжекторной системы, при которых могут быть обеспечены максимальный коэффициент захвата и минимальные фазовые размеры пучка на выходе системы, не зависящие от импульсного тока в диапазоне  $I_0 \approx 0.1-7$  А.

### Исходные уравнения

Решение поставленной задачи проводилось в рамках однородной стационарной самосогласованной модели взаимодействия аксиального потока электронов с полями электродинамических структур [9,10]. Вдоль канала пучка предполагается наличие продольного фокусирующего магнитного поля, позволяющего не учитывать поперечное движение частиц. В заданном диапазоне ускоряемых токов при плотности  $\approx 10^9-10^{11}$  частиц/см<sup>3</sup> влияние полей пространственного заряда несущественно. Учитывая это, запишем уравнение движения частиц и возбуждения поля в следующем виде [10]

$$\frac{\partial \psi(z, \tau)}{\partial z} = \frac{\omega}{c} \left( \frac{\gamma(z, \tau)}{\sqrt{\gamma(z, \tau)^2 - 1}} - \frac{1}{\beta} \right) - \frac{d\varphi(z)}{dz}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \gamma(z, \tau)}{\partial z} = \frac{e}{mc^2} E(z) \cos \psi(z, \tau). \quad (2)$$

$$\frac{dE(z)}{dz} + \alpha E(z) = I_0 \alpha R_{III} \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\tau f_0(\tau) \cos \psi(z, \tau). \quad (3)$$

$$\frac{d\varphi(z)}{dz} = \frac{I_0 \alpha R_{III}}{E(z)} \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\tau f_0(\tau) \sin \psi(z, \tau), \quad (4)$$

где  $\psi(z, \tau)$ ,  $\gamma(z, \tau)$  — фаза и релятивистский фактор частицы;  $E(z)$ ,  $\varphi(z)$  — амплитуда и фаза электрического поля;  $f_0(\tau)$  — функция распределения частиц на входе в инжекторную систему;  $z$  — продольная координата;  $\tau = \omega t$  — фаза влета частицы в систему в момент времени  $t$ ;  $\omega$  — круговая частота электрического поля;  $I_0$  — импульсный ток пучка, подаваемого на вход инжектора;  $\alpha$  и  $R_{III}$  — коэффициент затухания и шунтовое сопротивление соответственно;  $e$ ,  $mc^2 \gamma_0$  — заряд и энергия инжекции электрона;  $c$  — скорость света.

Исходные характеристики и конструктивные особенности рассматриваемой (рис. 1) инжекторной системы состоят в следующем: рабочий тип колебания предгруппирующего резонатора  $E_{010}$ ; трансформатор типа волны стандартный [11]; в качестве подсекций волноводной части используются круглые диафрагмированные волноводы на  $\pi/2$  типе колебаний с коэффициентом затухания  $\alpha = 6.8 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$  и шунтовым сопротивлением  $R_{III} = 46.7 \cdot 10^4 \text{ Ом/см}$ ; в начале первой подсекции создается напряженность продольной электрического поля  $E(0) = 100 \text{ кВ/см}$ , общая длина системы не превышает 120 см, на вход группирующего устройства подается монохроматичный непрерывный пучок электронов с энергией  $W_0 = 80 \text{ кэВ}$  в диапазоне токов  $I_0 = 0.1-7 \text{ А}$ .

### Результаты расчета

При расчете данной формирующей системы учитывалась возможность использования ее без предгруппирующего резонатора. Поэтому расчет проводился в два этапа: сначала находились оптимальные характеристики кусочно-неоднородной секции с регулируемым скачком (продольные размеры подсекций  $L_1$ ,  $L_2$  и пролетного участка  $l_2$ , фазовые скорости резонансной волны  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  в соответствующих подсекциях), а затем подбирались необходимые параметры остальных элементов.

1. Кусочно-неоднородная группирующая секция. Варьированием фазовой скорости ускоряющей волны в интервале  $\beta_1 = 1.0-0.86$  получены зависимости среднеквадратичного фазового  $\sigma_F$  (рис. 2) и относительного энергетического  $\sigma_w(W)$  (рис. 3) разбросов от длины первой подсекции для токов  $I_0 = 0.1-5 \text{ А}$ . На рис. 2,3 для наглядности представлены по три зависимости: 1 —  $\beta = 0.94$ , 2 — 0.92, 3 — 0.90. Следует заметить, что на длине  $L_1 \leq 50 \text{ см}$  при заданных токах

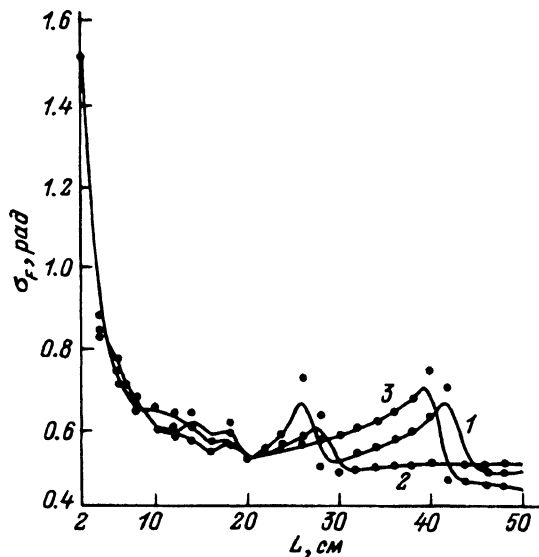


Рис. 2. Зависимость среднеквадратичного фазового разброса от длины первой подсекции.

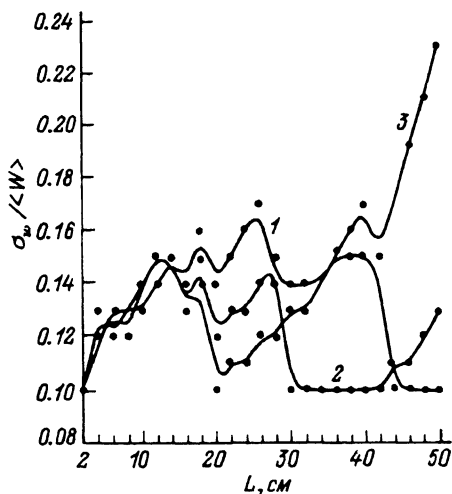


Рис. 3. Зависимость среднеквадратичного энергетического разброса от длины первой подсекции.

нагрузка практически не проявляется. Это связано с несинфазным излучением электронов в формирующихся сгустках фазовой протяженностью от  $2\pi$  на входе до  $\approx 0.55\pi$  на выходе подсекции. Из требования максимума коэффициента захвата структуры при минимуме среднеквадратичных фазового и энергетического разбросов, а также устойчивости средней энергии  $\langle W \rangle$  пучка к отклонениям фазовой скорости ускоряющей волны (см. зависимости на рис. 2,3) получены следующие оптимальные параметры первой подсекции: фазовая скорость основной гармоники  $\beta_1 = 0.92$ , длина  $L_1 = 30$  см, коэффициент захвата  $KЗ \approx 0.58$ . Поскольку средняя скорость частиц на выходе первого КВД достигает  $0.99c$ , то длина пролетного участка между подсекциями в интервале  $l_2 \approx 0-15$  см может быть произвольной, а вторая подсекция с  $\beta_2 = 1$  и оптимальным выбором скачка фазы ускоряющей волны обеспечит дальнейшее эффективное доускорение пучка на длине  $L_2 = 50$  см, меньшей предельной.<sup>1</sup>

Таким образом, данная инжекторная система без предгруппирующего резонатора с полученными выше оптимальными параметрами ( $\beta_1 = 0.92$ ,  $L_1 = 30$  см,  $l_2 = 15$  см,  $\beta_2 = 1$ ,  $L_2 = 50$  см) при коэффициенте захвата  $KЗ \approx 58$  позволяет формировать сгустки со следующими среднеквадратичными разбросами: по энергии  $-\sigma_w/\langle W \rangle \approx 2\%$ , по фазам  $-\sigma_F \leq 30^\circ$ , по фазам  $86\%$  частиц в окрестности максимума энергетического спектра, составляющих остов сгустка  $-\sigma_{F,0} \approx 18^\circ$ , независимо от величины импульсного тока в диапазоне  $I_0 = 0.1-5$  А.

2. Предгруппирующий резонатор и пролетный участок. Этот этап оптимизации системы заключается в выборе амплитуды моделирующего напряжения  $U_R$  на пролетном зазоре шириной 2 см предгруппирующего резонатора, длины пролетного участка  $l_1$ , фазы ускоряющей волны на входе в первую подсекцию  $\varphi_{вх1}$ , а также скачка фазы между первой и второй подсекциями  $\varphi_{12} = \varphi_{вх2} - \varphi_{вх1}$ .

Для определения амплитуды модулирующего напряжения резонатора от него до волноводной структуры численно получена зависимость фокусного расстояния  $l_f$  от отношения  $\chi = W_0/|eU_R|$ , которая в области  $\chi = 3-50$  имеет вид

$$l_f \approx 3.5\chi[\text{см}]. \quad (5)$$

Из (5) следует, что при  $l_1 \equiv l_f = 14$  см амплитуда напряжения на зазоре резонатора находится в области  $U_R \approx 20$  кВ ( $l_1$  ограничена предполагаемыми габаритами инжекторной системы). Для определения оптимальной фазы влета в первую подсекцию  $\varphi_{вх1}$  промодулированного по плотности пучка и уточнения величины  $U_R$  получены зависимости коэффициента захвата КЗ волноводной структуры от  $\varphi_{вх1}$  при следующих модулирующих напряжениях (рис. 4): 1 —  $U_R = 10$ , 2 — 20, 3 — 30, 4 — 40 кВ. Видно, что для  $U_R = 20$  кВ достигается наилучшая фазовая устойчивость коэффициента захвата при достаточно высоком его уровне  $KЗ \approx 0.8$ . Фазу  $\varphi_{вх1}$ , при которой достигается максимальное значения  $KЗ_{\max}$  (рис. 4), будем считать оптимальной. Значения оптимальных фаз ускоряющей волны на входе первой подсекции и соответствующих коэффициентов захвата представлены в табл. 1.

Для приведенных выше значений  $\varphi_{вх1}$  и  $U_R$  (табл. 1) проведена оптимизация скачка фазы  $\varphi_{12}$  по характеристикам энергетических и фазовых

<sup>1</sup> Предельной называется длина, на которой амплитуда поля достигает минимального значения.

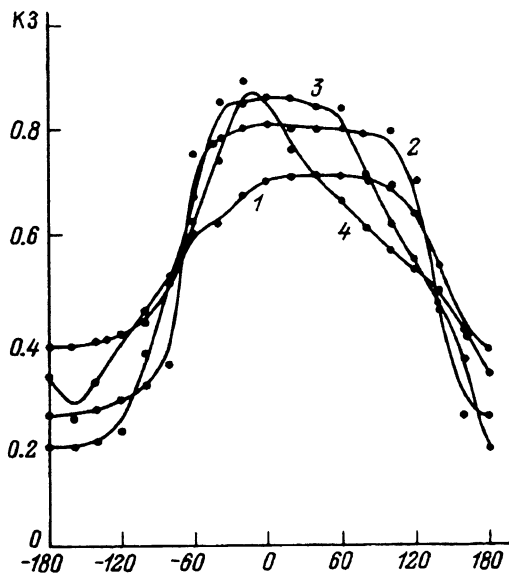


Рис. 4. Зависимость коэффициента захвата от фазы поля на входе первой подсекции.

спектров пучка на выходе инжекторной системы. Затем для набора найденных оптимальных значений  $\varphi_1$ , представленных в табл. 2, получены зависимости минимального среднеквадратичного энергетического разброса частиц в сгустке  $\sigma_w^{\min}/\langle W \rangle$  (рис. 5, сплошные линии 1-3), минимального фазового разброса  $\sigma_F^{\min}$  (рис. 5, пунктир 1'-3') и минимального фазового разброса 86% частиц в окрестности максимума энергетического спектра  $\sigma_{F0}^{\min}$  (рис. 6), от токов  $I_0 = 0.1, 1, 5.7$  А. На рис. 5,6 номера линий соответствуют следующим величинам: 1,  $1' - \varphi_{\text{вх}1} = 50^\circ$ ,  $U_R = 10$  кВ; 2,  $2' - \varphi_{\text{вх}1} = 0$ ,  $U_R = 20$  кВ; 3,  $3' - \varphi_{\text{вх}1} = 10^\circ$ ,  $U_R = 30$  кВ; параметры фазового объема пучка при  $U_R = 40$  кВ графически не представлены, поскольку значительно отличались в худшую сторону по энергетическому

Таблица 1.

$U_R$ , кВ	$\text{КЗ}_{\text{max}}$	$\varphi_{\text{вх}1}$ , град
10	0.71	50
20	0.82	0
30	0.86	10
40	0.89	-20

Таблица 2.

$I_0$ , А	$\varphi_{12}$ , град		
	$U_R = 10$ кВ	$U_R = 20$ кВ	$U_R = 30$ кВ
0.1	111	113	111
1	112	114	111
5	123	122	127
7	125	115	120

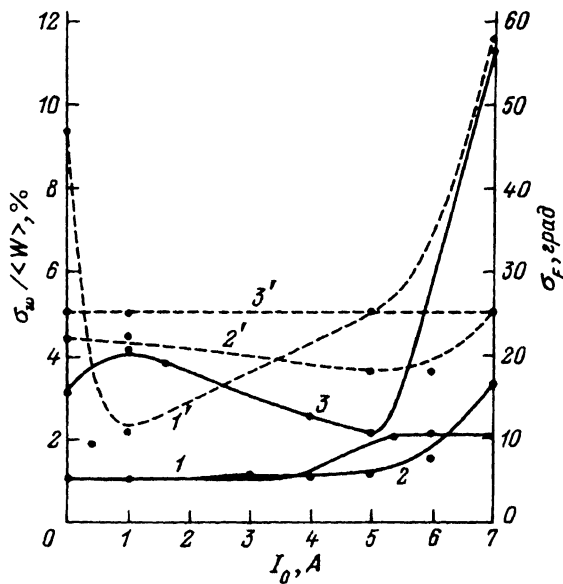


Рис. 5. Зависимости среднеквадратичных разбросов по энергии  $-\sigma_w / \langle W \rangle$  (сплошные линии), по фазам  $\sigma_F$  (пунктир) от импульсного тока.

и фазовому разбросу от остальных. Из рис. 5,6 видно, что амплитуда напряжения на зазоре резонатора  $U_R \cong 20$  кВ является самой оптимальной с точки зрения постоянства фазовых размеров пучка при изменении токового режима в заданной области, а также, как следует из табл. 2, при этом напряжении на зазоре резонатора требуется минимальный диапазон регулировок скачка фазы —  $\Delta\varphi_{12} \cong 9^\circ$ .

Учитывая последнее и то, что при отклонении  $\varphi_{12}$  от оптимального значения на  $\Delta\varphi_{12} \mp 10^\circ$  продольные размеры сгустков практически не изменяются, а энергетический разброс увеличивается на  $\Delta\sigma_w \cong 1\%$ , можно утверждать, что фиксированный скачок фазы  $\varphi_{12} \cong 114^\circ$  будет оптимальным в заданной области токов при напряжении на зазоре резонатора  $U_R \cong 20$  кВ.

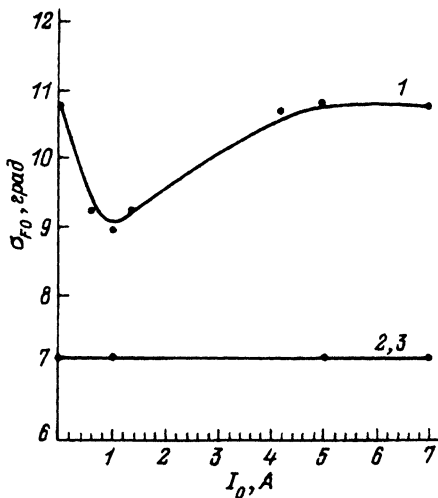


Рис. 6. Зависимость среднеквадратичного фазового разброса 86% частиц в окрестности максимума энергетического спектра.

## Заключение

Рассмотренная в данной работе оптимизированная инжекторная система с регулируемым скачком фазы, основанная на традиционных механизмах группировки, при отсутствии предгруппирующего резонатора обеспечивает коэффициент захвата  $KЗ \cong 0.58$  и позволяет формировать пучки с среднеквадратичным фазовым разбросом остова сгустка не больше  $\sigma_{F0} \cong 18^\circ$  и энергетическим  $\sigma_w \cong 2\%$  независимо от величины тока пучка на входе системы в области  $I_0 \cong 0.1-5$  А. Наличие резонатора приводит к возрастанию коэффициента захвата до  $KЗ \cong 0.8$ , а параметры спектральных характеристик пучка уменьшается (фазовый разброс остова до  $\sigma_{F0} \cong 7^\circ$ , энергетический до  $\sigma_w \cong 1-2\%$ ) и остаются постоянными на интервале токов  $I_0 \cong 0.1-7$  А. При этом значение скачка фазы может быть фиксированным, что значительно упрощает конструкцию системы.

Таким образом, рассмотренная нами инжекторная система полностью удовлетворяет требованию независимости коэффициента захвата и фазового объема от реализуемого токового режима ускорения и поэтому может быть рекомендована для применения в качестве формирующего устройства пучка электронов в линейных ускорителях многоцелевого назначения.

Автор выражает признательность Айзацкому Н.И. за постановку задачи и Курилко В.И. за ценные замечания и обсуждение результатов.

### Список литературы

- [1] Вальднер О.А. Линейные ускорители электронов. М.: Атомиздат 1966. 168 с.
- [2] Вишняков В.А., Пантелейменко В.Н. // Линейные ускорители. Харьков, 1968. С 43-47.
- [3] Веcko В.М., Володин В.А., Гусаров В.Н., Рациков В.И. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Линейные ускорители. Харьков, 1975. Вып. 1(1). С. 45-46.
- [4] Афанасьев В.Д., Вишняков В.А., Рудычев В.Г. // РиЭ. 1978. Т. 23. № 5. С. 1022-1029.
- [5] Jawes M.B., Miller R.H. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1981. Vol. NS-28. N 3. P. 3461-3463.
- [6] Sinclair C. // Proc. of the 1981 Particle Accelerator Conf. 1981. P. 2649-2651.
- [7] Демидов Н.В., Довбня А.Н., Кушнир В.А. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования (Теория и эксперимент). Харьков, 1992. Вып. 4(25). С. 80-83.
- [8] Айзацкий Н.И., Опанасенко А.Н. // Тез. докл. 9 Всесоюз. семинара по линейным ускорителям заряженных частиц. Харьков, 1985. С. 19.
- [9] Масунов Э.С. // ЖТФ. 1976. Т. 46. Вып. 1. С. 146-150.
- [10] Айзацкий Н.И., Мазненко Л.А. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 4. С. 680-683.
- [11] Вальднер О.А., Собенин Н.П., Зверев Б.В., Шедрин И.С. Справочник по диафрагмированным волноводам. М.: Атомиздат, 1970. 376 с.

Харьковский физико-технический  
институт

Поступило в Редакцию  
13 августа 1992 г.  
В окончательной редакции  
3 декабря 1992 г.